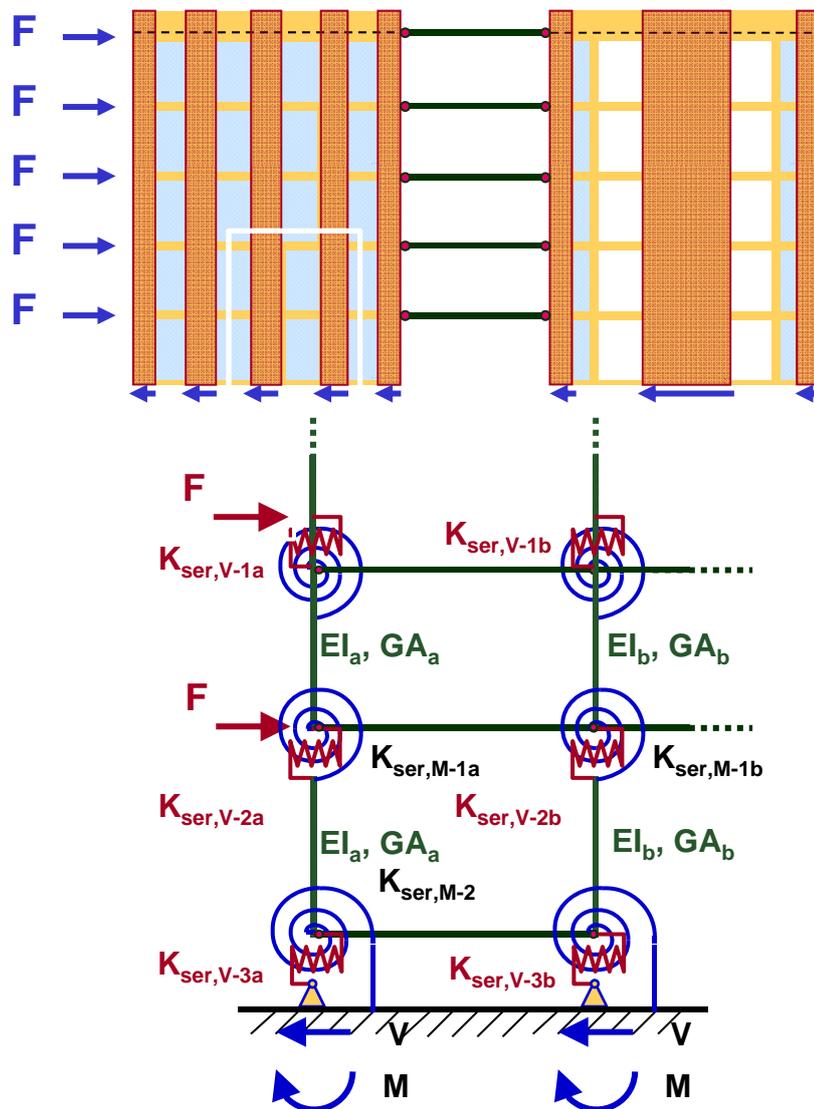


L'edificio in legno di grande dimensione

Gli aspetti strutturali

Andrea Bernasconi



L'effetto della dimensione sulla struttura portante

1 Introduzione

La definizione e il dimensionamento della struttura portante sono fra i compiti essenziali della progettazione di ogni grande costruzione. Sapendo che la sicurezza della costruzione dipende direttamente dal corretto dimensionamento della struttura, questa affermazione dovrebbe godere di appoggio e sostegno illimitati. L'avvento del legno lamellare incollato negli anni 70 del secolo scorso ha aperto al legno la strada delle grandi strutture portanti per capannoni di ogni tipo, per uso pubblico e sportivo, cui si sono aggiunti in alcuni casi anche i capannoni industriali. Il questo caso le prestazioni e le dimensioni del materiale non permettevano dubbi sul fatto che l'impiego efficace del nuovo materiale richiedeva un approccio strutturale diverso da quanto non avesse fatto fino ad allora la carpenteria in legno di tipo tradizionale. La storia dell'evoluzione tecnologica ci insegna che proprio attorno all'impiego del legno lamellare è nata l'ingegneria del legno e sono state sviluppate soluzioni adeguate per collegamenti, dettagli costruttivi, agganci al suolo, giunti di montaggio, ecc. Si tratta in parte di una evoluzione che continua ancora adesso e che regolarmente permette di migliorare le prestazioni, non solo tecniche, dell'impiego del legno lamellare. Probabilmente il semplice fatto che la produzione di legno lamellare è stata fin dall'inizio riservata a quella parte dell'industria del legno che ha accettato la sfida del materiale nuovo e il passaggio dalla tecnologia di produzione artigianale a quella industriale, ha reso facilmente comprensibile la necessità di riconoscere il carattere di "grande struttura" - e quindi di prestazione ingegneristica di qualità - di questi progetti.

Nell'ambito dell'edificio, indipendentemente dall'uso di tipo residenziale piuttosto che amministrativo o scolastico, l'evoluzione verso le grandi dimensioni è avvenuta partendo dalla casa con struttura di legno, aumentandone in modo rapido e progressivo il numero di piani, arrivando alla grande struttura per apparenti piccoli passi, aggiungendo di volta in volta un piccolo incremento. Ed è in questo modo che solo pochi anni fa l'edificio di legno era tacitamente riservato alla casa mono familiare o plurifamiliare se a schiera, pur se non più realizzata in modo artigianale, ma sempre più spesso in modo industrializzato. Con la liberalizzazione di alcune restrizioni di tipo formale nei paesi dalla tradizione della costruzione in legno più marcata, questa costruzione semplice sotto tutti i punti di vista ha cominciato a crescere, aggiungendo di volta in volta un piano in più, per arrivare a proporre oggi edifici multipiano che in alcuni casi superano anche il limite degli otto piani, spesso visto come limite formale oltre il quale la terminologia diventa quella degli "edifici alti". Che la struttura di un edificio di 2 piani sia profondamente diversa da quella di un edificio di 8 piani, è cosa che nessuno mette in discussione. E nessuno mette in discussione il fatto che le soluzioni tecniche e progettuali da mettere in atto in un caso e nell'altro siano profondamente diverse fra loro. Nel primo caso si ha a che fare con soluzioni tecniche basate sull'esperienza artigianale pluriennale e ben consolidata, nel secondo si a che fare con strutture che a tutti gli effetti meritano la definizione di grande opera di ingegneria. Le osservazioni seguenti si limitano a descrivere gli aspetti particolari che la struttura portante delle grandi strutture dell'edilizia di legno deve considerare.

Come il semplice aumento della dimensione della costruzione possa marcare i limiti della tecnologia applicata e come il passaggio di scala nella dimensione di una costruzione possa significare la necessità di modifiche sostanziali della tipologia strutturale, può essere mostrato analizzando la

tipologia costruttiva per l'edificio di legno ancora oggi più diffusa al mondo, e cioè quella della costruzione intelaiata.

La costruzione intelaiata di legno, è composta da elementi piani formanti solai e pareti. La discesa dei carichi in queste strutture prevede la distribuzione delle sollecitazioni su tutto il perimetro delle pareti, in modo da ridurre al minimo le sollecitazioni locali. Gli elementi strutturali sono, però, il risultato dell'assemblaggio di più componenti. All'origine l'elemento di solaio e di parete erano composti esclusivamente da elementi lineari di sezione molto ridotta: travetti di legno massiccio per formare i montanti verticali della parete o per formare le travi del solaio, e tavole sottili per formare il rivestimento strutturale e creare un elemento stabile nel proprio piano. I montanti e le travi inflesse, completate con una travatura di bordo su tutto il perimetro dell'elemento, formano l'intelaiatura, le tavole di rivestimento formano il rivestimento strutturale che permette di mantenere la forma dell'elemento piano, di garantirne la stabilità e la funzionalità strutturale.

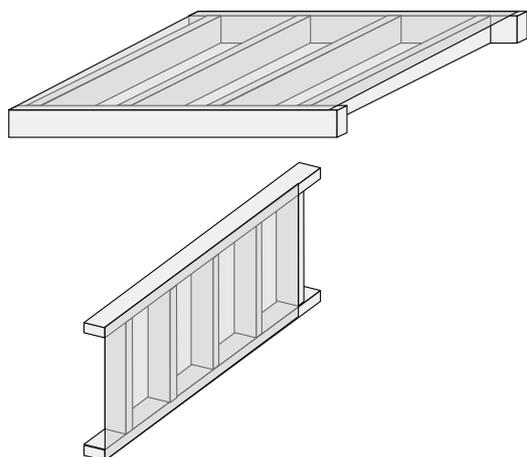


Figura 1: Elementi di solaio e di parete della costruzione intelaiata

Più tardi, con l'avvento dei pannelli truciolari e di compensato di piallacci e sfogliati, le tavole inclinate del rivestimento strutturale dell'intelaiatura sono state rimpiazzate dai pannelli sottili, oggi di regola rappresentati in questo caso dai pannelli OSB. La parete, come il solaio, dell'edificio intelaiato è quindi formata da un telaio e da un rivestimento strutturale sottile, che, indipendentemente dal tipo di pannello usato, di regola presenta uno spessore di ca. 20 mm.

Dal punto di vista strutturale questi elementi sono formati da due componenti ben distinte: il telaio e la pannellatura. Al telaio, formato da travi o montanti, spetta il compito di assumere tutte le sollecitazioni derivanti dalle forze perpendicolari al piano dell'elemento, come pure della discesa delle forze verticali agenti sulle pareti dell'edificio. Alla pannellatura spetta il compito di irrigidire e stabilizzare questi elementi, come pure quello della discesa delle sollecitazioni orizzontali nel medesimo piano degli elementi strutturali, o, semplicemente, quello della controventatura orizzontale e verticale di tutta la struttura.

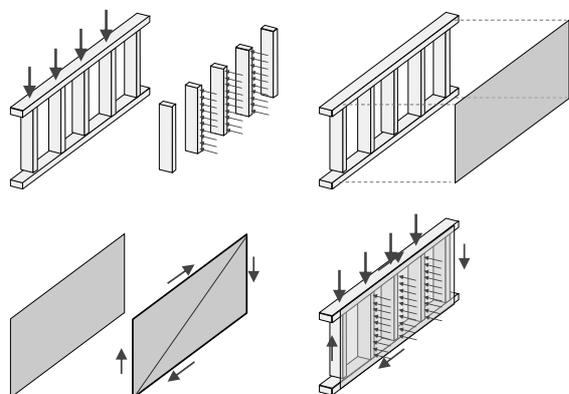


Figura 2: Composizione dell'elemento di parete intelaiata - funzione strutturale delle sue componenti

Alla pannellatura spetta, inoltre, il compito della funzione strutturale locale, cioè nello spazio fra i montanti delle pareti o fra le travi del solaio. L'interasse ridotto fra questi ultimi elementi è quindi giustificato sia dalla necessità di ridurre le sollecitazioni distribuendole su un numero di elementi elevato, sia dalla necessità di non avere luci troppo grandi fra i singoli elementi di travi e di montanti. Di regola questo interasse si situa fra i 550 e i 650 mm. Il collegamento fra la pannellatura e l'intelaiatura è normalmente eseguito con connettori di tipo meccanico.

Questa tipologia strutturale, sta alla base dell'evoluzione e del successo della costruzione di legno in ambito edile degli ultimi decenni nel mondo intero. Gli edifici di legno più moderni e costruiti fino alla fine degli anni '90 del secolo scorso sono praticamente tutti stati concepiti, progettati e realizzati secondo questo principio, che è stato adattato e modificato con l'evoluzione delle esigenze strutturali. Si tratta quindi di una tipologia costruttiva e strutturale che può essere senz'altro definita come adatta alle esigenze attuali e moderna. Il principio, e il grosso vantaggio, della struttura intelaiata originale, prevede la distribuzione delle sollecitazioni e dei carichi sull'integralità degli elementi piani (solai e pareti), in modo che ogni elemento lineare (travi dei solai e montanti delle pareti) sia sollecitato da una porzione di carico ridotta; l'unione di un numero elevato di elementi permette di far fronte alla totalità delle forze agenti sulla struttura dell'edificio, creando così l'effetto strutturale degli elementi piani di parete e di solaio.

Cercando i limiti di questo sistema strutturale, non si può fare a meno di osservare come l'effetto di superficie di questi elementi strutturali sia ottenuto tramite la pannellatura del rivestimento strutturale, che, di fatto, presenta uno spessore molto limitato. Dal punto di vista strutturale questo spessore ridotto è senz'altro accettabile e permette di adempiere a tutte le funzioni strutturali, a condizione beninteso che esso sia dimensionato, verificato e realizzato a regola d'arte. Anche in caso di edifici di dimensioni importanti, questa struttura permette la realizzazione di elementi strutturali sufficientemente rigidi e resistenti. In caso di strutture particolarmente esigenti, per esempio in caso di edifici di altezza elevata e con un numero di pareti strutturali ridotte, si possono intravedere i primi limiti di questa tipologia. In questi casi il rivestimento delle pareti deve essere accuratamente concepito, se necessario aumentando gli spessori della pannellatura e scegliendo materiali - sempre fra i pannelli sottili - di spessore più elevato o che offrano caratteristiche meccaniche più elevate: i pannelli OSB ad alta resistenza, oppure l'uso di pannelli di compensato di piallacci, combinati con l'aumento del numero di connettori fra telaio e pannellatura, o ancora l'incollatura strutturale fra la pannellatura e il telaio, permettono quasi sempre di risolvere questi problemi e di realizzare la struttura richiesta dal progetto, senza doverne sconvolgere il

concetto di base. La scelta di realizzare i singoli elementi di parete o di solaio tramite l'uso di incollature strutturali impone però, di fatto, il passaggio ad una tecnologia di produzione decisamente più impegnativa ed esigente.

La parete della struttura intelaiata è prevista come elemento continuo e senza interruzioni importanti. Di fatto, ogni apertura presente nella parete rappresenta, quindi, un'interruzione dell'elemento strutturale e deve essere analizzata e studiata nel dettaglio. La soluzione di questa situazione si trova nell'aggiunta di un elemento di rinforzo della parete, chiamato comunemente architrave, che permette di spostare i carichi presenti sull'apertura verso le parti adiacenti della parete, e di garantire così la discesa dei carichi verso il basso.

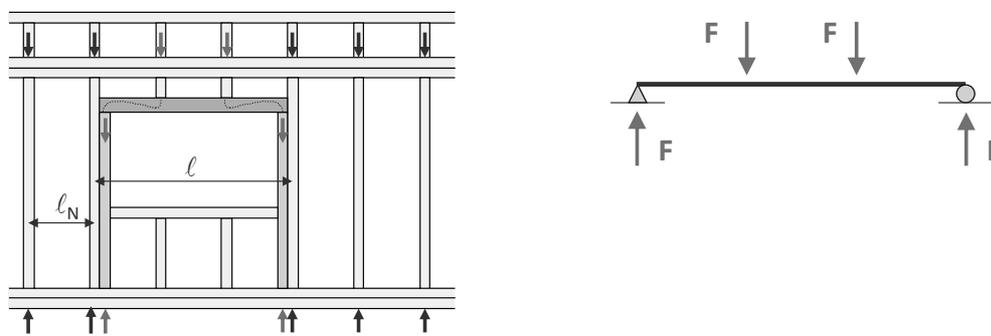


Figura 3: Architrave nella parete intelaiata

In presenza di aperture sulle pareti, quindi, la distribuzione delle sollecitazioni non può più essere distribuita su tutta la lunghezza dell'elemento di parete, ed in particolar modo in prossimità delle aperture si presenta una concentrazione di sollecitazioni tanto più importanti quanto più grande è l'apertura nella parete. Visto che la discesa delle forze verticali avviene esclusivamente tramite i montanti verticali della parete, queste concentrazioni di sollecitazioni in prossimità delle aperture non hanno un effetto solo locale, ma si presentano su tutti gli elementi di parete di livello inferiore. Il principio dell'introduzione dell'architrave si presta quindi molto bene fintanto che l'edificio presenta un numero di piani limitato, o fintanto che le aperture sulle pareti si trovano nella medesima posizione, permettendo quindi di rinforzare la parete in un numero di punti limitato.

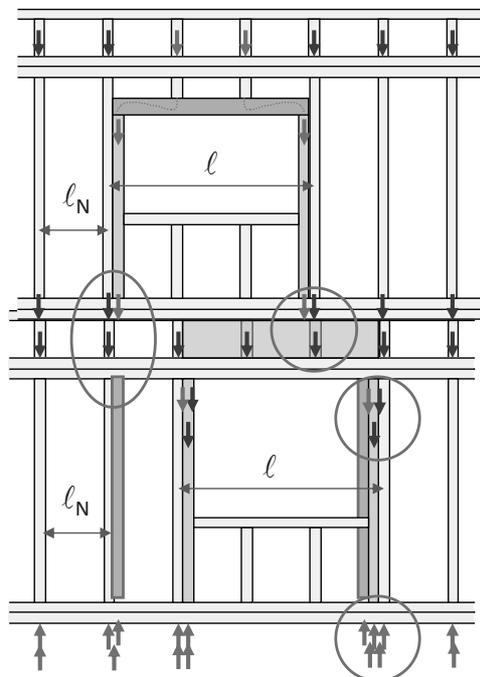


Figura 4: Architravi in costruzioni a più piani con aperture non regolari

L'applicazione di questo principio ad edifici multipiano comporta quindi l'evoluzione della struttura intelaiata di base verso una struttura adattata alla geometria dell'edificio. Il grado di complessità della struttura portante aumenterà con l'aumentare della dimensione delle aperture nelle pareti, con l'aumentare delle irregolarità o discrepanze in pianta fra i diversi piani che compongono l'edificio e con l'aumentare della variazione della posizione delle aperture nelle pareti. Nelle costruzioni di grandi dimensioni ciò porta spesso alla definizione di una struttura più simile al principio della struttura a travi inflesse e pilastri, che a quella della costruzione intelaiata: la discesa dei carichi verticali è concentrata in una griglia di pilastri, adattata alle esigenze geometriche del progetto, sui quali appoggiano travi inflesse di dimensioni anche importanti. Gli elementi di solaio, benché eseguiti secondo il principio indicato sopra, sono semplicemente appoggiati sulla travatura che forma lo scheletro dell'edificio. Anche le pareti sono realizzate come elementi intelaiati, ma non formano più la struttura portante principale dell'edificio, essendo solo inserite nello scheletro formato da pilastri e travi inflesse; la funzione della controventatura dell'edificio è assicurata dalla pannellatura delle pareti, che assumono anche la funzione di stabilizzazione dello scheletro della struttura principale. Strutture di questo tipo sono senz'altro efficaci e adatte alla realizzazione di edifici di grandi dimensioni. Esse richiedono però una concezione - strutturale e costruttiva - accurata, e sono piuttosto lontane dal principio originale della struttura intelaiata.

La struttura intelaiata prevede che ogni elemento di parete sia composto da un telaio chiuso alle sue estremità da due correnti orizzontali, che assicurano il corretto montaggio della pannellatura e il fissaggio della medesima lungo tutto il perimetro della parete. Uno dei punti deboli di questa costruzione è notoriamente l'attraversamento degli elementi orizzontali da parte delle forze di compressione nei montanti. Il calcolo mostra che a partire da 4 piani di altezza il limite della resistenza allo schiacciamento trasversale del legno può essere superato, creando schiacciamenti locali importanti e inaccettabili. Inoltre le deformazioni dovute a questo schiacciamento si accumulano di piano in piano, creando con

questo numero di piani uno schiacciamento complessivo dell'edificio tanto grande da non poter essere accettato senza correre il rischio di danni sugli elementi di facciata o di dover constatare assestamenti irregolari sull'insieme dell'edificio.

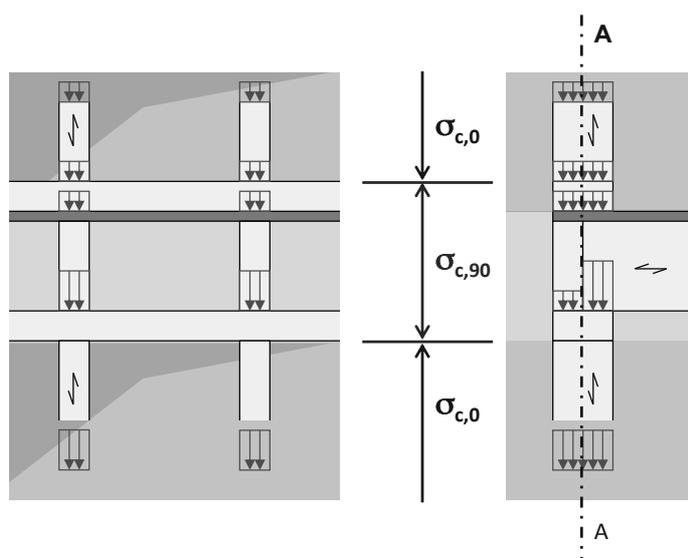


Figura 5: Schiacciamento locale dovuto a sollecitazione trasversale nella zona dell'interpiano

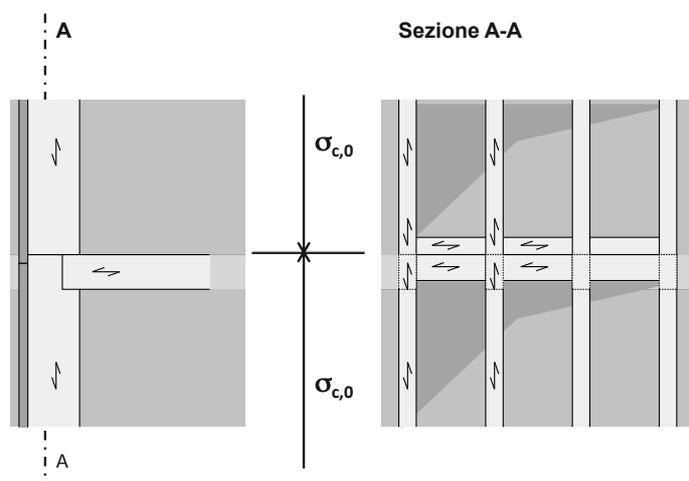


Figura 6: Soluzione con montanti verticali a contatto, senza elementi trasversali sollecitati dalla discesa dei carichi

La struttura in questi casi è stata adattata alle esigenze della grande dimensione, sviluppando soluzioni nuove e più adatte. In primo luogo devono essere eliminati gli elementi di legno sollecitati nel piano trasversale. Ciò può avvenire per esempio creando la continuità dei montanti verticali e l'interruzione dei correnti orizzontali; in tal caso occorre accettare che i correnti orizzontali siano interrotti dai montanti verticali, creando quindi un numero di elementi maggiore e una produzione più impegnativa.

La gestione delle aperture poco regolari, come indicato nella figura 4, trasforma la parete intelaiata in una struttura composta da pilastri e architravi di sezione importante: la struttura intelaiata si trasforma in

una struttura a travi e pilastri, dove la dimensione e la posizione delle aperture determinano la posizione dei montanti verticali della struttura. Il tamponamento di chiusura delle pareti è di regola realizzato sotto forma di elementi intelaiati, che formano la struttura secondaria locale e sostengono la pannellatura di controventatura.

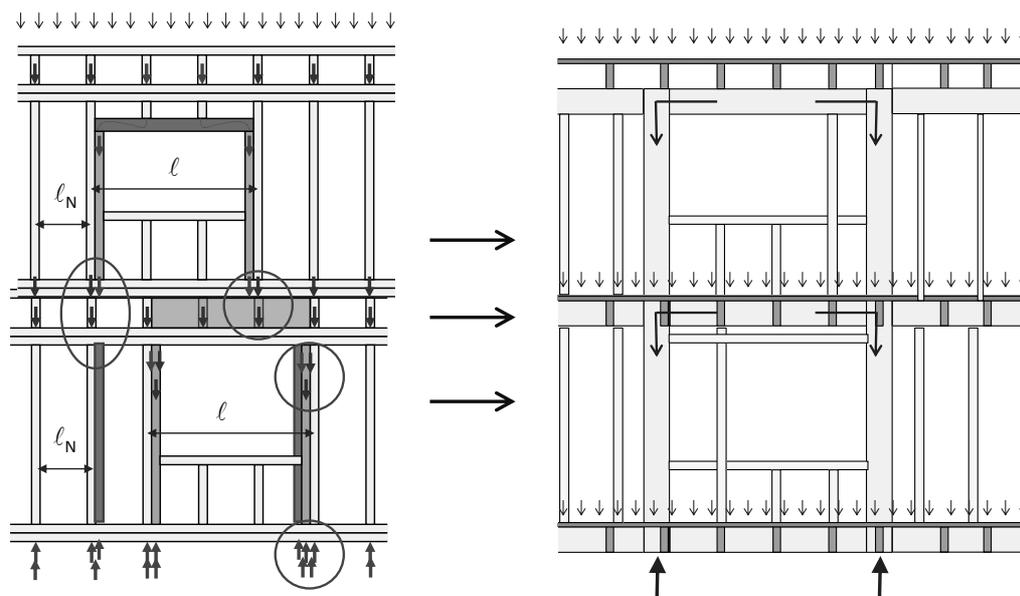


Figura 7: La struttura intelaiata si trasforma in una struttura a travi e pilastri

Queste considerazioni non significano che la tipologia strutturale della costruzione intelaiata non sia adatta alla realizzazione di edifici con un numero di piani elevati, anzi ne dimostrano il contrario. Si deve però anche costatare che l'aumento del numero di piani comporta una modifica sostanziale di questa tipologia strutturale. Queste considerazioni permettono anche di mostrare come determinate soluzioni strutturali e costruttive presentino dei limiti, senza che siano riconosciuti o descritti come tali in modo generale. È risaputo che si descrive come costruzione intelaiata in legno ogni tipo di costruzione realizzata con la pannellatura di rivestimento a controventare l'insieme della struttura, senza andare a distinguere se i carichi verticali sono concentrati in pochi assi verticali formati da pilastri con sezioni importanti, o invece sono distribuiti sull'insieme dei montanti verticali della parete.

2 Le tipologie costruttive per le grandi dimensioni

2.1 Le strutture secondarie di legno

Alcune regole e prescrizioni antincendio in vigore in diversi paesi europei hanno portato allo sviluppo degli edifici multipiano di legno con le parti della costruzione riservate ai vani delle scale e degli ascensori in calcestruzzo armato. Si tratta di una soluzione strutturale spesso usata per edifici con un numero di piani fra 4 e 6, che recentemente è stata utilizzata anche per edifici di dimensioni ancora maggiori. La presenza di un nucleo in calcestruzzo armato sufficientemente importante permette di usare questa parte della struttura per l'irrigidimento orizzontale dell'intero edificio. La rimanente costruzione in legno è semplicemente accostata alla struttura di calcestruzzo ed è composta da pilastri o

verticali ammessi come provvisti di cerniera ad ogni estremità, e ogni livello, e non contribuisce in alcun modo all'irrigidimento dell'insieme della struttura o alla sua controventatura. Essendo la maggior parte delle solette e delle pareti realizzata come costruzione in legno, gli edifici di questo genere vengono classificati come costruzioni in legno. In ambito tecnico la struttura in legno viene però spesso anche definita come struttura secondaria, in quanto la struttura principale dell'edificio è formata dal nucleo centrale in calcestruzzo.

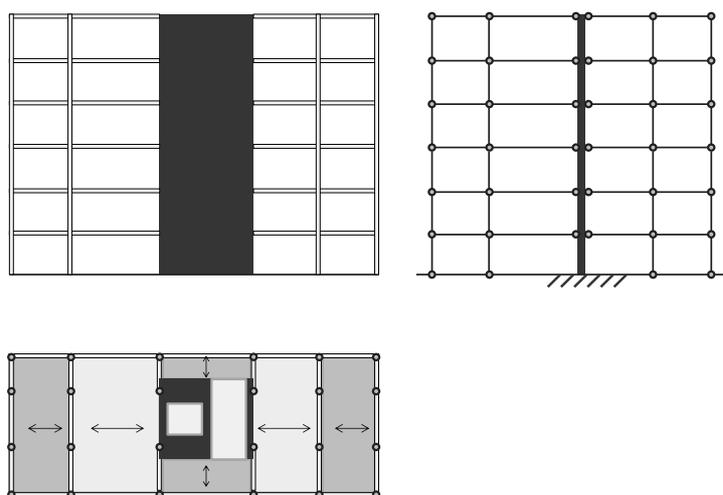


Figura 8: Vista (in alto) e pianta (in basso) della struttura portante principale in CA e della struttura secondaria formata da pilastri travi e solai in legno

In questo modo si ottiene un edificio realizzato in modo preponderante in legno, la cui struttura portante è formata essenzialmente dalla costruzione in calcestruzzo armato del nocciolo centrale: dal punto di vista strutturale la costruzione può essere descritta come una costruzione in calcestruzzo con una struttura secondaria in legno.

Edifici di questo tipo sono spesso caratterizzati da una struttura in calcestruzzo piuttosto imponente, anche se in alcuni casi poco riconoscibile. Tutte le forze orizzontali, dovute all'azione del vento e all'azione sismica, sono infatti trasmesse direttamente su questo unico elemento di irrigidimento, che in caso di numero di piani elevati si trova quindi ad essere sollecitato in modo particolarmente importante. La costruzione in legno, in modo coerente con la definizione di struttura secondaria, si fa carico della funzione portante a livello locale e della discesa dei soli carichi verticali nelle colonne più esterne dell'edificio. I tamponamenti delle pareti non hanno funzione di irrigidimento della struttura e possono essere realizzati a piacimento anche sotto forma di grandi aperture o pareti vetrate. Le solette della costruzione in legno assumono anche la funzione di setti orizzontali e assicurano la trasmissione delle forze orizzontali al nucleo centrale in calcestruzzo armato.

Si tratta di una soluzione spesso adottata nei paesi germanofoni, dove la tradizione della costruzione in legno ben presente sul territorio e l'esigenza di realizzare i vani delle scale con un materiale non combustibile hanno portato a farne una soluzione piuttosto standard per gli edifici fra i 4 e i 6 piani. Aumentando ulteriormente il numero di piani, occorre aumentare anche le dimensioni del nocciolo in calcestruzzo armato, a causa delle sollecitazioni importanti cui deve rispondere; in questi casi i corridoi

di accesso ai diversi appartamenti sono integrati in questa struttura, oppure i vani ad essa integrati assumono dimensioni più importanti.

2.2 Le strutture doppie o accoppiate

In alcuni casi sono stati proposti edifici con strutture doppie e indipendenti una dall'altra, realizzate con materiali diversi. Probabilmente dettati dalla ricerca di una forma di protezione antincendio semplice dei vani scale e delle altre vie di fuga, questo tipo di soluzione richiede la realizzazione di due strutture indipendenti, realizzate con materiali diversi, nello stesso edificio. Tralasciando il tema della protezione antincendio, che probabilmente non può essere risolto con la semplice scelta di un materiale minerale per la realizzazione di una parte della struttura dell'edificio, questo tipo di soluzione richiede una particolare attenzione al comportamento diverso e indipendente delle due strutture. In caso di rischio sismico è necessario assicurare una distanza fra le due strutture, che permetta di escludere il martellamento dell'una sull'altra in caso di evento sismico. Pur mancando regole e prescrizioni specifiche alle strutture di legno a questo riguardo, le prescrizioni normative vigenti in Italia impongono distanze minime fra le due strutture, che mal si addicono a edifici con un numero di piani troppo elevato.

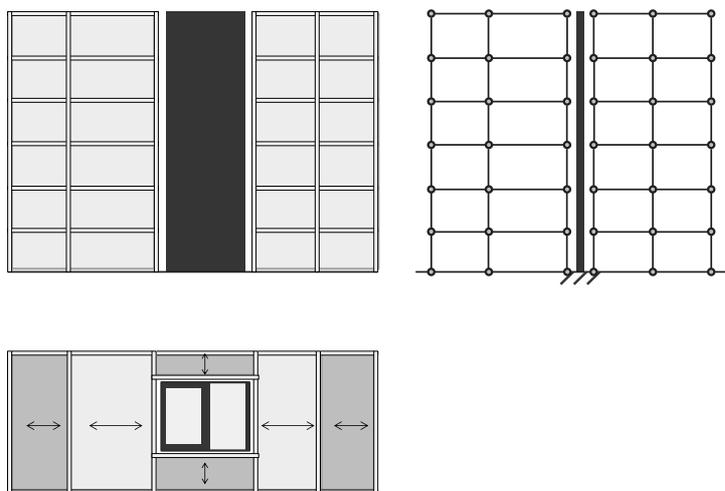


Figura 9: Vista (in alto) e pianta (in basso) della struttura portante principale in CA e della struttura indipendente realizzata in legno

2.3 Le strutture intelaiate a travi e pilastri

Come indicato al capitolo precedente, la struttura intelaiata di un edificio multipiano può essere descritta anche come una struttura a travi e pilastri con la controventatura realizzata tramite la pannellatura sottile del tamponamento delle pareti. I carichi verticali sono concentrati sugli assi verticali e continui su tutta l'altezza dell'edificio.

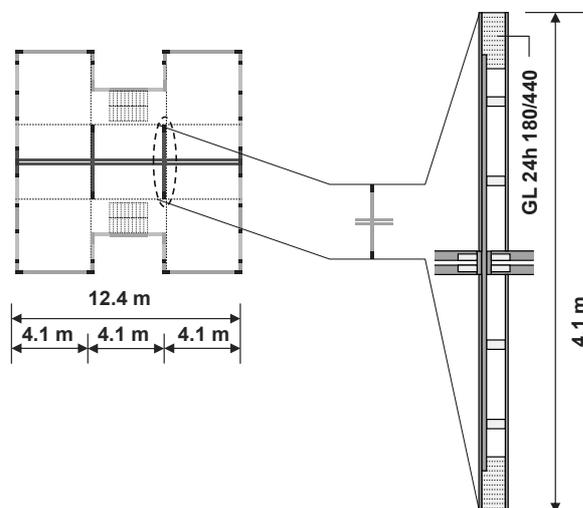


Figura 10: parete intelaiata di un edificio di 6 piani con struttura portante in legno

Le dimensioni delle colonne verticali dipendono direttamente dall'altezza complessiva dell'edificio e dal numero delle stesse colonne. Nell'immagine si nota come le colonne alle estremità della parete siano di dimensioni decisamente più importanti di quanto non preveda il principio delle pareti intelaiate, dove anche i montanti al bordo degli elementi di parete mantengono le medesime dimensioni dei montanti al centro della parete. La discesa dei carichi verticali è concentrata sugli assi verticali alle estremità delle aperture, che coincidono con gli assi alle estremità degli elementi di parete chiusa.

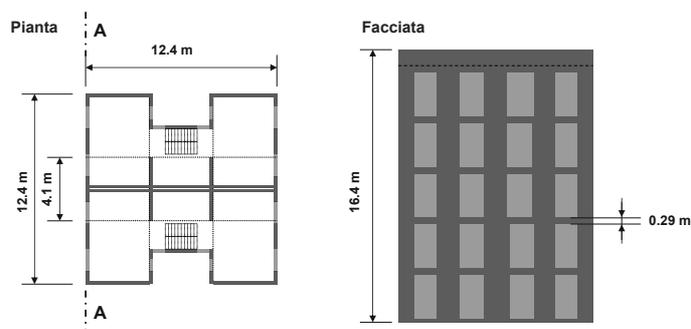


Figura 10: pianta e facciata di un edificio di 6 piani con struttura portante in legno

Nella figura 11 è rappresentata la pianta dell'edificio e la disposizione delle aperture nella facciata. In figura 12 è rappresentata la vista delle pareti verticali che compongono la struttura dell'edificio. Sulle colonne alle estremità delle pareti sono scaricati i carichi provenienti dalla travatura necessaria a sormontare le aperture.

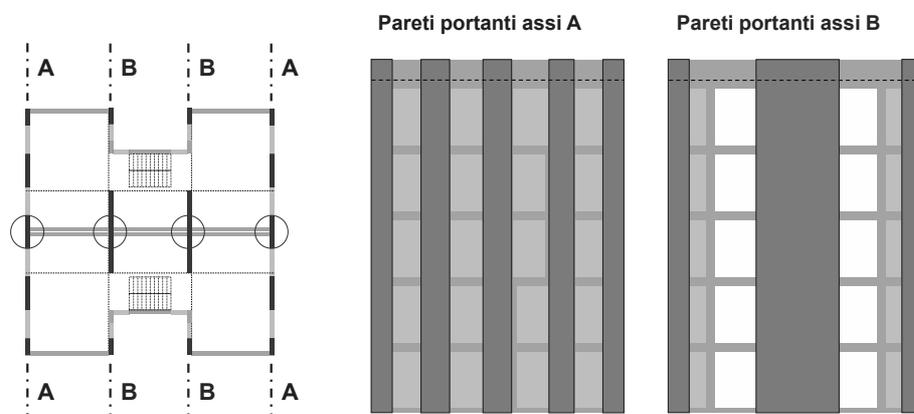


Figura 12: pianta e vista delle pareti con le aperture

La parete in figura 10 corrisponde alla parete centrale della vista sull'asse B in figura 12. Dalle dimensioni delle colonne alle estremità della parete appare chiaramente come i carichi verticali siano concentrati su queste colonne, mentre i montanti centrali abbiano solo una funzione strutturale locale e di sostegno della pannellatura di rivestimento.

2.4 Le strutture in XLAM

Le strutture con pannelli XLAM sono la soluzione più recente per la realizzazione della struttura portante degli edifici. Spesso è considerata come una tipologia costruttiva in concorrenza diretta e in alternativa con le strutture intelaiate; in realtà si tratta di due soluzioni costruttive e strutturali che hanno in comune soltanto il materiale legno da cui traggono origine.

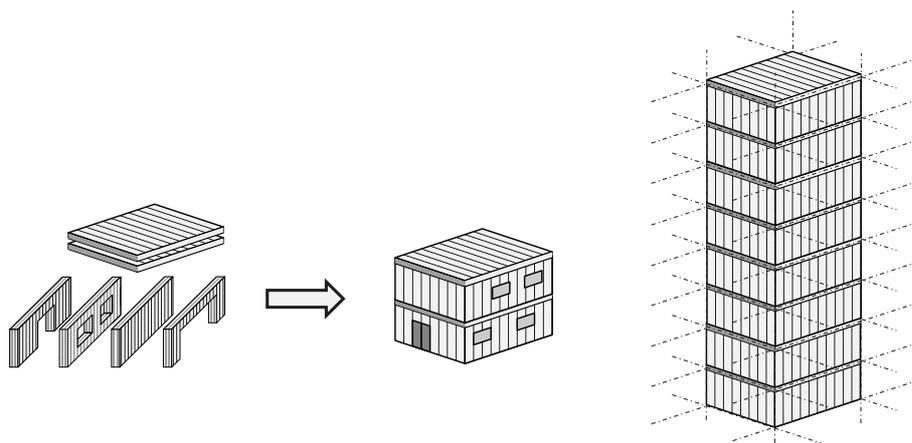


Figura 13: Struttura dell'edificio realizzata con pannelli XLAM

Nelle piccole dimensioni la struttura intelaiata della casa di uno o due piani in legno può essere sostituita in modo semplice da una struttura a pannelli XLAM: la struttura intelaiata è composta da pareti, che a loro volta sono composte dai montanti verticali e dalla pannellatura di rivestimento a formare un elemento strutturale piano, che in prima approssimazione può essere visto come una superficie strutturale più o meno omogenea; il pannello XLAM risponde praticamente alla medesima definizione,

trattandosi di una superficie strutturale sottile. In questo contesto il pannello XLAM e la costruzione intelaiata possono essere visti come concorrenti diretti e come alternativa.

Con l'aumentare del numero di piani, le similitudini fra le due tipologie costruttive e strutturali si riducono e scompaiono. La struttura intelaiata descritta al capitolo precedente concentra i carichi su un numero ben definito di assi verticali e con l'aumentare del numero di piani le parti interne delle pareti assumono sempre più le sole funzioni strutturali relative alla struttura secondaria con effetto locale e della controventatura dell'insieme della struttura. La struttura con pannelli XLAM, invece, grazie all'effetto strutturale di superficie dei pannelli XLAM, permette la distribuzione progressiva delle forze verso il basso su tutta la lunghezza delle pareti disponibili, permettendo di sfruttare ai fini strutturali tutto il materiale disponibile malgrado lo spessore ridotto delle pareti. Ne risultano strutture scatolari e tridimensionali con prestazioni decisamente elevate. Sulla base di questa considerazione è probabile che i pannelli XLAM permettano una ulteriore e importante evoluzione delle prestazioni strutturali delle costruzioni in legno, completando e ampliando l'offerta finora limitata alle sole strutture intelaiate.

3 Le esigenze strutturali della robustezza

3.1 Principio e esigenze

L'esigenza della robustezza di una struttura è codificata nelle normative sulle strutture portanti al pari dell'esigenza della verifica allo stato limite ultimo, o della verifica dello stato di servizio. Nel testo del DM08, cioè della normativa italiana per le costruzioni, è indicato in modo esplicito che "si dovranno adottare tutti quei provvedimenti atti a incrementare la robustezza strutturale e cioè a diminuirne la sensibilità nei confronti di tali azioni (sisma, fuoco, eventi meteorici di entità non prevista dalle norme pertinenti ecc.). In particolare si dovranno adottare idonee scelte progettuali." Il riferimento è alle azioni eccezionali e non previste esplicitamente sotto forma di caso di carico, alle quali vuole porre rimedio il principio di una sufficiente robustezza della struttura: con robustezza della struttura si intende la capacità nei confronti di azioni eccezionali di evitare danni sproporzionati rispetto all'entità delle cause innescanti quali incendio, esplosioni, urti, ecc. Si tratta di un aspetto che la costruzione in legno finora non ha praticamente mai preso in considerazione, per la semplice ragione che in caso di strutture di dimensioni modeste i fenomeni di collasso progressivo sono privi di significato: il collasso locale per raggiungimento dello stato limite ultimo rappresenta già il danno massimo o totale della struttura, per cui un danno ulteriore per collasso successivo di altri elementi non è pertinente.

Può essere curioso e interessante notare come il principio e il criterio della robustezza della struttura siano stati introdotti dopo che si erano verificati casi di collasso successivo di grandi costruzioni dell'edilizia residenziale realizzata con pannelli prefabbricati di calcestruzzo armato e collegati fra loro in modo troppo semplice e debole. Si noti che si tratta della medesima tecnologia costruttiva e strutturale di quelle della costruzione in legno delle strutture multipiano a grande scala, come si sta cominciando a realizzarle soprattutto, ma non solo, con i pannelli XLAM.

Robustezza significa che in caso di collasso locale, accidentale e completo di un elemento della struttura portante dell'edificio, la stabilità globale della costruzione non è messa in discussione grazie alla presenza di percorsi alternativi della discesa dei carichi, che permettono di aggirare la parte di struttura venuta a mancare. Concretamente ciò significa che in caso di mancanza accidentale di una parete strutturale - o di una soletta - i carichi da essa sopportati possono essere trasferiti su un altro

elemento della struttura, in modo da impedire il collasso degli elementi vicini, e quindi il collasso di quelli a loro vicini e via di seguito, fino al crollo totale dell'edificio.

Si tratta di un principio di dimensionamento e di progettazione strutturale che dovrebbe far parte del buon senso e della deontologia professionale di ogni progettista, senza che si debba fare riferimento ad una prescrizione normativa. A parte questa considerazione e al riferimento esplicito e già citato nel testo del DM08, che ne fa una prescrizione legale a tutti gli effetti, una definizione più dettagliata sulla necessità di considerare anche questo aspetto e di dimostrare la robustezza delle strutture è contenuta nel testo della parte 1-7 dell'Eurocodice 1 (EN1991, Actions on structures: Part 1-7 accidental actions), che include gli edifici multipiano con numero di piani fra 5 e 15 ad uso hotels, caseggiati, appartamenti o altri edifici residenziali e uffici nella classe di conseguenze 2b - elevato livello di rischio - in relazione alla necessità di verificarne la robustezza. È interessante notare che per gli edifici scolastici lo stesso rischio si ha fra 2 e 15 piani e che l'unica classe di rischio più importante esistente comprende gli edifici oltre i limiti indicati, quelli previsti per l'accesso di un numero elevato di persone, o ancora gli stadi con più di 5000 spettatori.

Secondo questo criterio, quindi, l'edificio residenziale a grande scala inizia con un numero di piani pari a 5.

3.2 Criterio di applicazione

Trattandosi di un evento eccezionale appare piuttosto evidente che il criterio di applicazione e di verifica della robustezza debba prendere in considerazione un danno imprevisto locale e riferito ad un elemento strutturale ben definito. La messa fuori servizio di una parete, o di una soletta, o di una colonna sembra ben corrispondere a questa definizione per il caso di un edificio multipiano. Delimitando la colonna con il collegamento con il solaio superiore o inferiore e delimitando la parete con il collegamento con il solaio superiore e inferiore sulla verticale, e con il collegamento con le pareti strutturali perpendicolari a se stessa sulla verticale, si definisce l'entità dell'elemento strutturale che deve poter essere messo fuori servizio senza che la stabilità globale della struttura sia messa in discussione.

Sulla base della struttura tridimensionale dell'edificio formata per esempio da pareti in XLAM, la verifica della robustezza richiede di simulare l'eliminazione di ogni elemento di parete e di dimostrare e verificare lo stato limite del percorso alternativo di discesa dei carichi corrispondente. La messa fuori servizio di un elemento di soletta è meno significativa, in quanto il collasso locale di una soletta non implica la messa in discussione diretta della stabilità globale della struttura dell'edificio. Non deve però essere dimenticato.

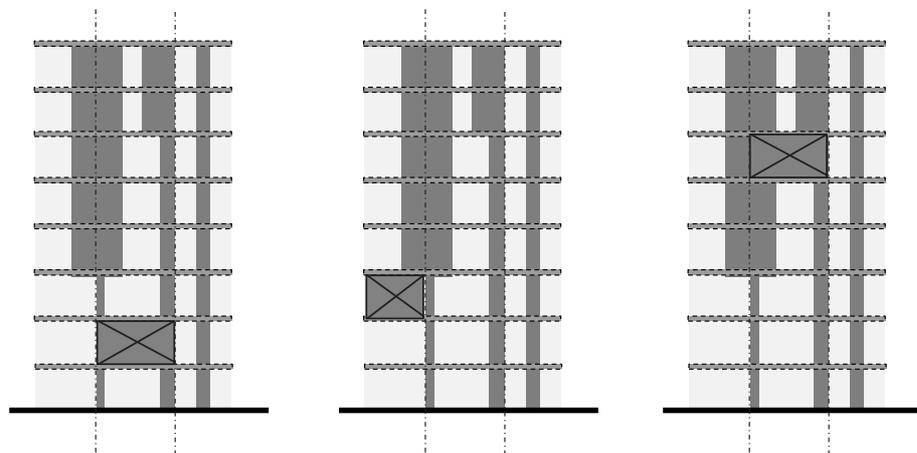


Figura 14: Vista verticale di una parete di edificio con le aperture e possibili elementi di parete mancanti per la verifica della robustezza strutturale - la messa fuori servizio di tutte le pareti deve essere verificata

Nel caso di strutture composta da travi e colonne occorre procedere secondo il medesimo principio e analizzare la possibilità di collasso locale di uno di questi elementi, tenendo conto anche della possibilità reale che un tale evento possa manifestarsi.

3.3 Verifiche necessarie e possibili percorsi alternativi dei carichi

Venendo a mancare un elemento strutturale, la discesa dei carichi deve avvenire tramite gli elementi ad esso vicino e immediatamente al di sopra di lui. La mancanza di un elemento di parete implica quindi la necessità della parete immediatamente al di sopra di quella fuori servizio, di fungere da trave parete e di trasferire alle pareti vicine il carico che non può transitare verso il basso. La soletta immediatamente al di sopra dell'elemento mancante deve quindi poter essere sospesa alla struttura sovrastante.

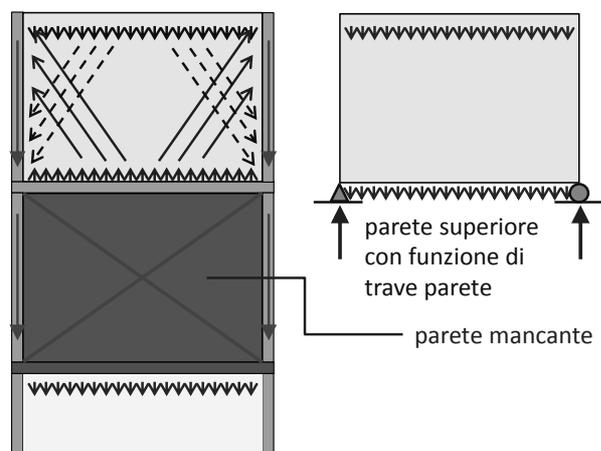


Figura 15: Parete interrotta e percorso di discesa dei carichi alternativo tramite la funzione di trave parete della parete superiore

Questo percorso di discesa dei carichi porta ad una sollecitazione maggiore di diversi elementi, quali i collegamenti che assicurano la sospensione della soletta e che collegano la parete superiore con quelle ad essa trasversali, come pure le pareti laterali verso il basso. Trattandosi di situazioni di carico eccezionali, la riduzione prevista dei coefficienti applicati ai carichi non richiede di regola rinforzi degli elementi strutturali nel loro insieme. Al contrario, a livello locale di introduzione e trasmissione delle forze, occorre verificare che i collegamenti siano in grado di assumere questo compito.

Il principio dei percorsi alternativi della discesa dei carichi è piuttosto semplice; devono invece essere valutati attentamente i casi, piuttosto frequenti, che solo in parte possono essere ricondotti allo schema appena indicato. La presenza di aperture nelle pareti comporta non soltanto l'eventuale necessità di un rinforzo locale, ma anche l'analisi accurata della situazione eccezionale appena descritta.

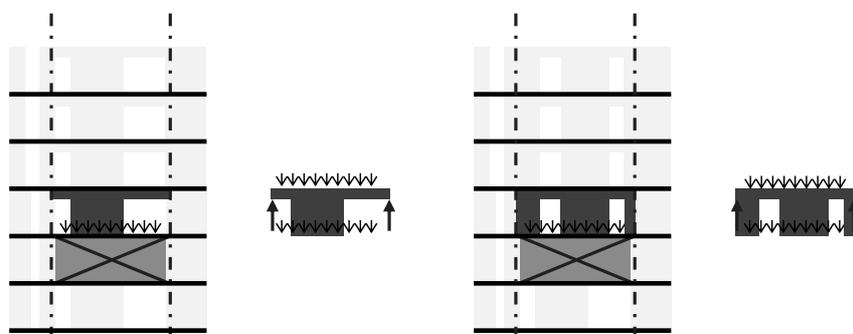


Figura 16: Parete interrotta funzione strutturale della trave parete risultante al piano superiore, indebolita dalle aperture

L'elemento di sostegno formato dalla parete al di sopra dell'elemento venuto a mancare è indicato nella figura 17. L'altezza ridotta della parete in concomitanza delle aperture ne riduce l'efficacia, per cui può essere necessario ricorrere all'azione della soletta inferiore con funzione di catena orizzontale a rinforzo della parete. In questo caso occorre assicurare non solo un collegamento adeguato fra la parete e la soletta, ma si deve garantire la continuità della soletta in particolar modo nella zona corrispondente all'apertura; ne risultano dei vincoli geometrici sulla dimensione e il posizionamento degli elementi di soletta. Inoltre da questa riflessione appare evidente come l'elemento di parete debba essere realizzato come elemento unico e non possa essere ottenuto tramite più elementi di piccole dimensioni.

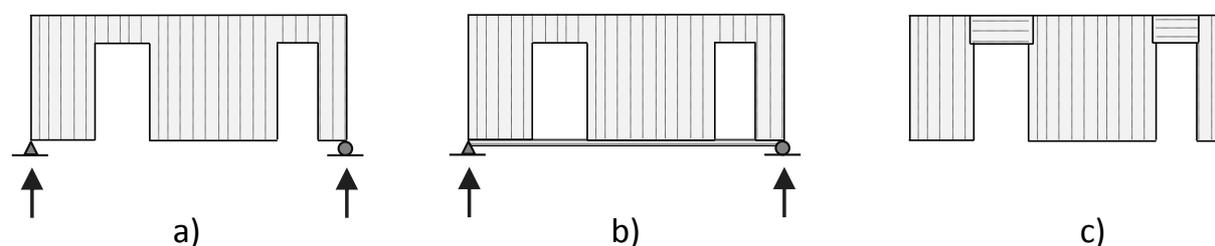


Figura 17: Trave parete in XLAM in presenza di aperture:

- elemento strutturale con riduzione di sezione in alcune zone
- elemento strutturale rinforzato dall'effetto catena della soletta inferiore
- elemento composto da più parti: poco adatto e sconsigliabile in caso di esigenze strutturali di questo tipo

Un ulteriore caso particolare e interessante è dato dalla presenza di colonne, come possono essere impiegate localmente anche in strutture completamente composte da elementi piani, per esempio in caso di aperture di grandi dimensioni. La figura 18 mostra come in questi casi l'ammissione del collasso locale ed eccezionale della parete sottostante comporti un'inversione del segno delle forze agenti nella colonna, che si ritrova a dover fungere da sospensione. Occorre quindi prevedere questo caso e realizzare le colonne con collegamenti adatti ad assicurare anche questa funzione.

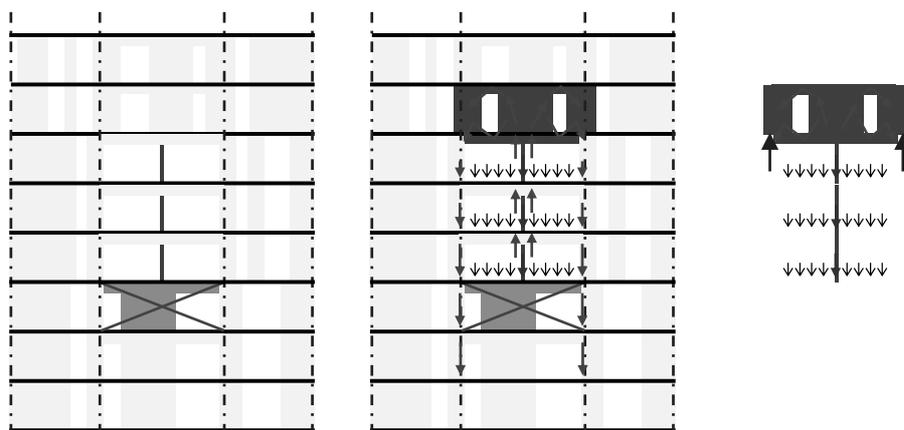


Figura 18: colonne con funzione di sospensione in caso di situazione eccezionale di verifica della robustezza

3.4 Conclusione

Il principio della robustezza della struttura dell'edificio multipiano rappresenta un criterio di progetto e di dimensionamento essenziale ai fini della sicurezza della costruzione. Che si tratti di una prescrizione normativa e quindi di un obbligo progettuale dovrebbe essere scontato. A prima vista, senza le conoscenze e l'esperienza approfondite con strutture di questo tipo e di questa dimensione, questa esigenza può essere vista come particolarmente impegnativa e problematica ai fini di una ottimizzazione della struttura e della sua realizzazione. In realtà la considerazione dei criteri di robustezza appena esposta rappresenta un banco di prova molto utile per la valutazione dell'intera struttura. Una struttura concepita e progettata in modo corretto, nel rispetto dei principi di base dell'ingegneria strutturale, non dovrebbe essere rimessa in questione a causa delle esigenze di robustezza appena mostrate. La valutazione delle esigenze di robustezza può invece richiedere il rinforzo locale di alcuni elementi strutturali e di collegamento, oppure aggiungere dei vincoli fondamentali per alcuni elementi della costruzione, quali le esigenze di continuità delle pareti o delle solette, o più semplicemente le dimensioni minime dei pannelli XLAM, o ancora la necessità di collegamenti più efficaci anche per i collegamenti non sollecitati in modo estremo dai casi di carico normali.

D'altra parte non si deve dimenticare che si tratta di criteri di progettazione strutturale che tipologie strutturali e costruttive simili, ma realizzate con altri materiali, hanno descritto e definito fin dalle loro prime esperienze nell'edilizia multipiano, e che quindi non rappresentano niente di nuovo.

4 L'importanza dei collegamenti nella struttura

4.1 Preambolo

La costruzione in legno artigianale e tradizionale dei tempi passati era basata essenzialmente sulla manualità e sull'esperienza dell'artigiano che la realizzava. Alla luce dei principi di dimensionamento e di verifica delle strutture applicati ai giorni nostri, spesso si costata che le sezioni delle costruzioni in legno realizzate un tempo sono formalmente sovradimensionate o comunque sottoposte a sollecitazioni ridotte se comparate alla resistenza del materiale. In mancanza dei mezzi di collegamento meccanici disponibili al giorno d'oggi, i collegamenti delle strutture artigianali di un tempo erano realizzati tramite intagli e incastri di carpenteria, che provocavano lavorazioni importanti delle sezioni nella zona delle connessioni, con conseguenti riduzioni locali delle sezioni. L'analisi delle sollecitazioni in queste zone, particolarmente indebolite, permette spesso di costatare come l'applicazione dei criteri odierni decreta un sottodimensionamento di queste zone, o delle sollecitazioni troppo importanti. Probabilmente non è sbagliato affermare che la carpenteria artigianale di un tempo concepiva prima di tutto i collegamenti della struttura e valutava e stabiliva la dimensione delle travi sulla base di queste considerazioni: di fatto probabilmente, quindi, tali strutture erano concepite sulla base di un dimensionamento dei collegamenti e non delle sezioni lorde.

L'avvento dell'ingegneria strutturale e l'analisi strutturale scientifica alla base del modo di procedere degli strutturisti al giorno d'oggi hanno portato alle procedure di progettazione attuali, che prevedono la verifica degli stati limite e degli stati di servizio. I collegamenti sono parte integrante di questa procedura di progettazione strutturale, e sono di regola affrontati in seconda battuta, una volta definiti gli elementi strutturali formati da travi, pannelli, piastre, ecc. Di regola i collegamenti sono considerati come elementi puntuali e singolari, con la sola funzione di trasmettere una forza di progetto da un elemento strutturale all'altro. Spesso inoltre sono considerati come una delle parti essenziali ai fini della concorrenzialità economica del progetto, con la conseguente tendenza alla loro riduzione nel numero e nella qualità. Si tratta di un modo di procedere che ha fatto le sue esperienze e che si è manifestato efficace nella costruzione in legno anche moderna. Il passaggio di dimensione verso la grande scala delle strutture in legno per gli edifici multipiano impone però di mettere in discussione questo aspetto e di analizzare e valutare la funzione dei collegamenti strutturali nel suo insieme.

4.2 Le caratteristiche dei collegamenti strutturali della costruzione in legno

I collegamenti strutturali impiegati nell'edilizia richiedono l'esecuzione in cantiere e sono quindi realizzati tramite mezzi di collegamento metallici. È risaputo che i collegamenti meccanici presentano un comportamento meccanico caratterizzato da una deformabilità - anche detto scorrimento - più o meno elastica che può essere descritta tramite il modulo di scorrimento K_{ser} . Si tratta di un parametro poco usato nei calcoli strutturali e spesso catalogato come un'indicazione supplementare da applicare in caso di necessità di determinazione precisa delle deformazioni della struttura. In realtà dietro a questa considerazione si deve costatare la deformabilità delle connessioni delle strutture in legno.

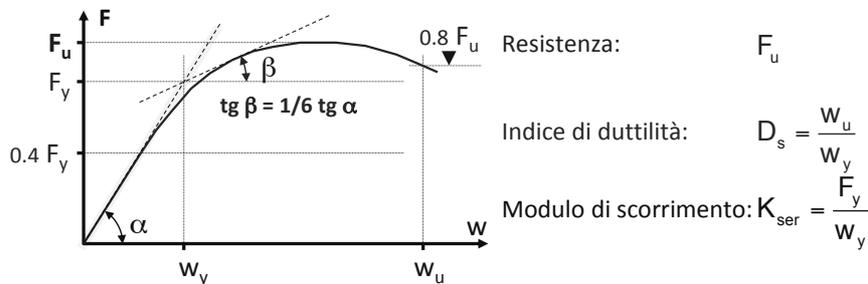


Figura 19: caratteristiche meccaniche dei collegamenti della costruzione in legno

In caso di strutture di entità modesta, questo modo di procedere è senz'altro corretto e la sua efficacia è dimostrata anche dallo stato dell'arte attuale. Il comportamento effettivo dei collegamenti, e in particolar modo la loro rigidità determinata dal parametro K_{ser} assume un ruolo più importante in caso di analisi sismiche più approfondite, che richiedono la definizione del comportamento dell'insieme della struttura in modo più approfondito, oppure nel caso di strutture di dimensioni più importanti, dove il numero di collegamenti in gioco è tanto grande da farle diventare un elemento essenziale ai fini dell'analisi strutturale e della determinazione delle forze agenti sui singoli componenti della struttura.

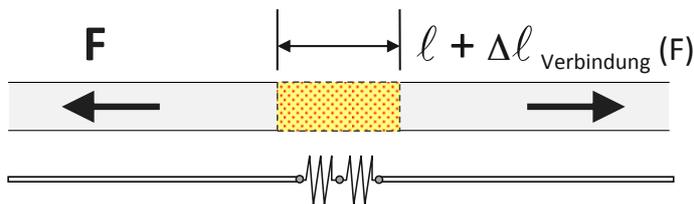


Figura 20: collegamento e modello elastico dei mezzi di collegamento

La definizione dei moduli di scorrimento è disponibile in parte tramite le normative per la costruzione in legno ed in parte tramite la descrizione dei profili prestazionali dei mezzi di collegamento contenuti nelle omologazioni dei rispettivi prodotti.

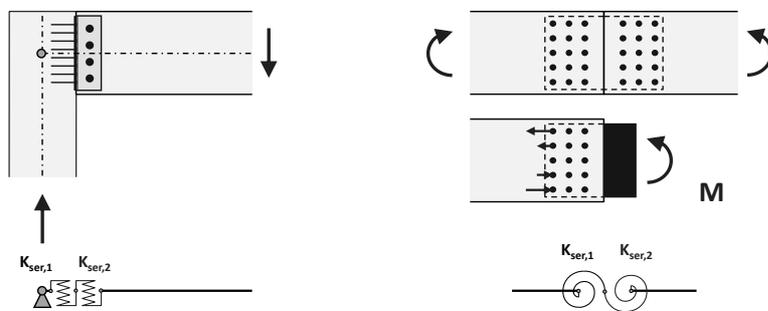


Figura 21: Modellizzazione della rigidità dei collegamenti

4.3 L'effetto della rigidità dei collegamenti

L'effetto della rigidità dei collegamenti si manifesta su tutte le tipologie della costruzione in legno. La parete intelaiata in figura 22 rappresenta una parete di due piani, interrotta dal solaio intermedio. L'analisi strutturale della parete richiede la modellazione di tutte le sue componenti e è spesso eseguita rappresentando il sistema strutturale della parete come un'asta incastrata al piede nelle fondamenta della struttura. L'effetto dell'azione di una forza orizzontale, data dall'azione del vento o del sisma, può essere eseguita sul modello semplice, a condizione di definire in modo corretto le caratteristiche meccaniche della parete.

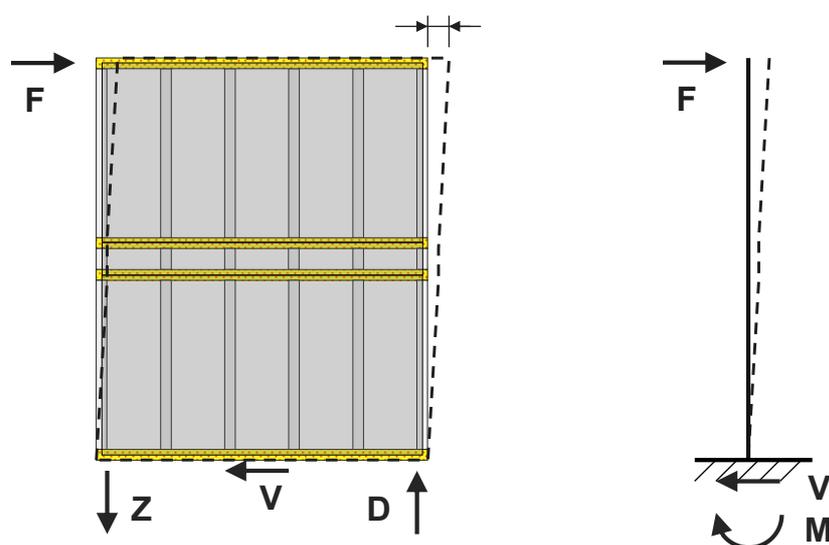


Figura 22: Elemento di trave incastrata quale modello strutturale della parete

Le caratteristiche di rigidità della parete così descritta devono essere ricavate dalle caratteristiche meccaniche degli elementi da cui è composta. Partendo dai valori dei moduli di elasticità dei materiali da cui è composta, è possibile definire i valori di rigidità del modello semplificato. La rigidità all'allungamento dei montanti e la rigidità a taglio della pannellatura di rivestimento strutturale sono i valori di riferimento per determinare la rigidità flessionale e la rigidità a taglio dell'elemento di trave del modello, così come indicato nelle figure 23 e 24.

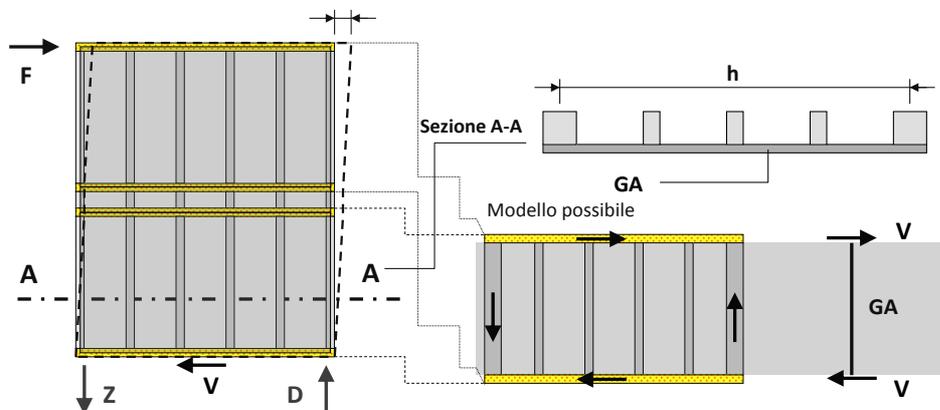


Figura 23: Rigidezza flessionale dell'elemento inflesso nel modello di calcolo

Figura 24: rigidezza a taglio dell'elemento inflesso nel modello di calcolo

L'effetto dei collegamenti si manifesta in più forme, e cioè in corrispondenza di ogni collegamento sollecitato all'interno della parete. Procedendo per tappe successive e iniziando con i collegamenti fra i montanti verticali all'interpiano si deve prima di tutto definire i collegamenti e poi rappresentarne il loro effetto sull'insieme della parete. La rigidezza dei collegamenti fra i montanti superiori e quelli inferiori si manifesta sulla rigidezza flessionale del modello di calcolo e può essere rappresentata come in figura 25.

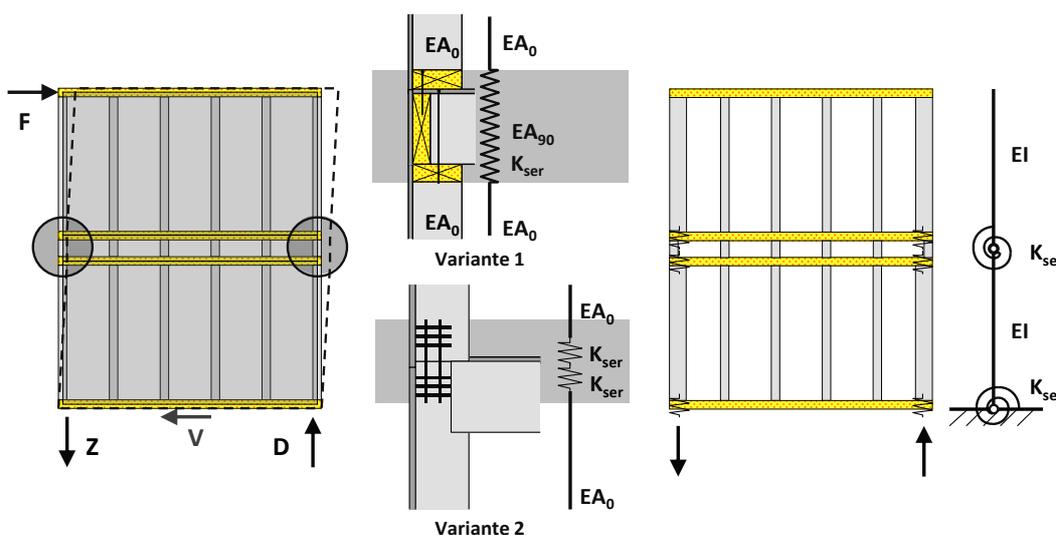


Figura 25: rigidezza dei collegamenti die montanti esterni della parete e conseguenze sul modello di calcolo

L'effetto della rigidità del collegamento fra la pannellatura e i montanti è indicato in figura 26 e si riferisce sia al collegamento fra la pannellatura e i montanti all'interno dell'elemento di parete, sia al collegamento fra la parete inferiore e quella superiore, responsabile del trasferimento delle forze di taglio orizzontali all'interno della parete.

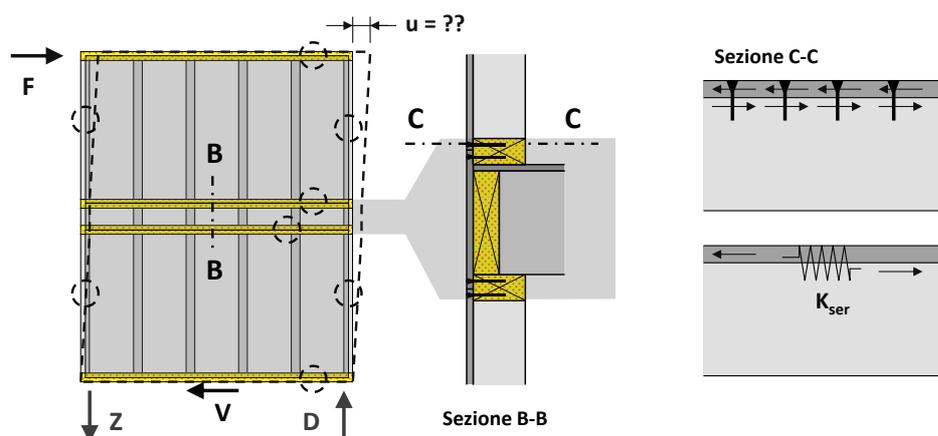


Figura 26: effetto della rigidità dei collegamenti a taglio

Si ottiene così il modello di calcolo rappresentato nella figura 27, che permette di analizzare il comportamento strutturale di questo elemento di parete e di tutti i suoi componenti.

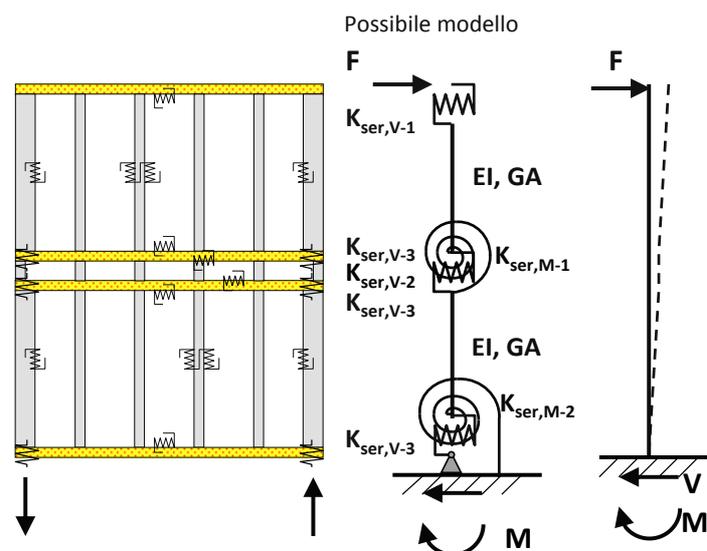


Figura 27: Modello di calcolo per l'analisi di una parete intelaiata di due piani

Pur apparendo a prima vista piuttosto complesso e impegnativo questo modello assume un'importanza non trascurabile, se si considera una struttura multipiano nel suo insieme. Nella figura 28 sono

rappresentate due pareti di un edificio di 6 piani (si vedano anche le figure 10, 11 e 12). In modo semplificato, i carichi orizzontali agenti sull'insieme della struttura devono essere distribuiti sulle diverse pareti verticali. Ammettendo questa funzione svolta dalle solette intermedie, che a loro volta sono ammesse come infinitamente rigide e non considerate ulteriormente in questo momento, si pone la domanda di come le diverse parti delle pareti verticali partecipino alla discesa dei carichi orizzontali e come questi siano suddivisi fra le diverse strisce di parete. Ciò è necessario non soltanto per determinare gli sforzi all'interno dei singoli elementi, ma anche per determinare le forze di ancoraggio della struttura di legno alle fondamenta.

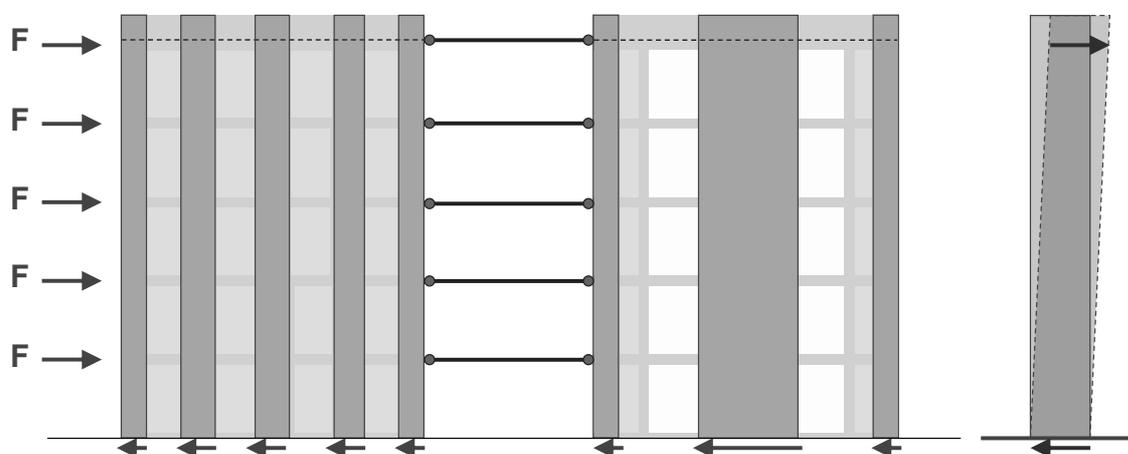


Figura 28: sistema strutturale di due pareti della costruzione, a loro volta composte da più strisce verticali di parete

L'ipotesi di calcolo applicata alla costruzione intelaiata di legno non considera i rapporti di rigidezza effettiva e parte dal principio che la rigidezza delle singole pareti è determinata in modo preponderante dalla rigidezza a taglio della pannellatura strutturale. Ne risulta una rigidezza delle singole strisce di parete proporzionale alla rispettiva lunghezza orizzontale, come indicato in figura 29. Si tratta di un'ipotesi assolutamente e corretta qualora si considerasse un edificio di un piano di altezza, e si tratta a buona ragione dell'ipotesi di calcolo in uso per gli edifici di pochi piani di altezza.

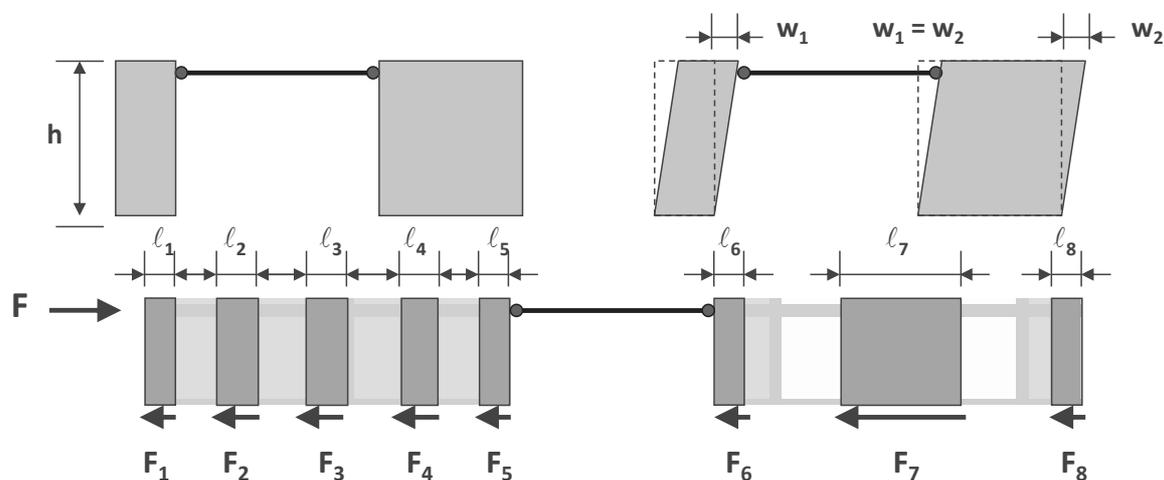


Figura 29: Distribuzione delle forze proporzionale alla lunghezza orizzontale delle parti di parete

In caso di edifici multipiano è possibile un approccio diverso e basato sulla considerazione delle diverse strisce di parete come elementi continui su tutta l'altezza dell'edificio. In tal caso si ottiene la rappresentazione indicata in figura 30. In questo caso la distribuzione delle forze avviene secondo la rigidità flessionale delle diverse parti di parete, e quindi in modo diverso da quanto ipotizzato in figura 29.

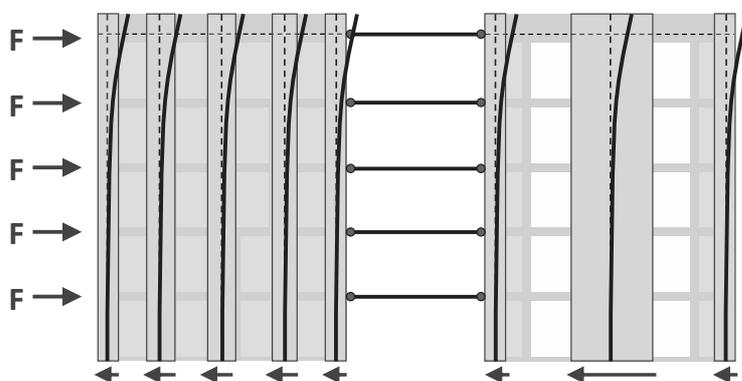


Figura 30: Distribuzione delle forze proporzionale alla rigidità flessionale delle parti di parete

La domanda di quale di questi due modelli sia più adatto e soprattutto corrisponda al meglio alla realtà della struttura non è di facile risposta, in quanto aumentando l'altezza dell'edificio le diverse componenti della rigidità della struttura assumono un'importanza e un effetto sul risultato diversi. Una risposta alla domanda può essere ottenuta tramite la modellazione completa della struttura, prendendo in considerazione tutte le sue parti e includendo nella considerazione la rigidità dei collegamenti. Il modello che ne risulta è indicato, in modo parziale, nella figura 31.

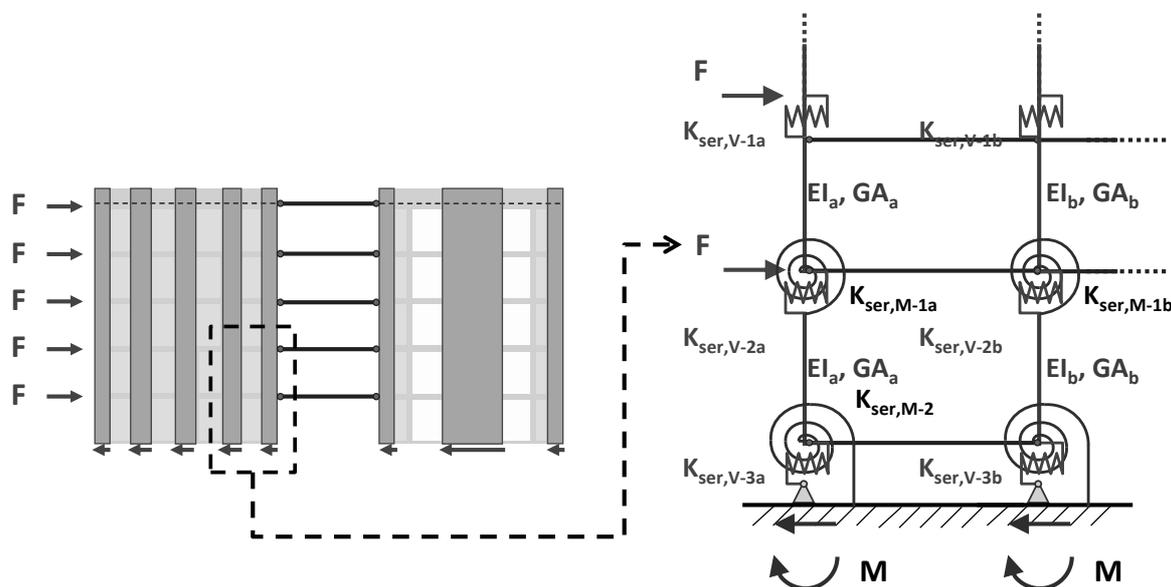


Figura 31: modello di calcolo per l'analisi della struttura dell'edificio, per una parte dell'edificio

La distribuzione e la grandezza degli sforzi agenti nei diversi elementi della struttura dipende quindi direttamente, e spesso in modo essenziale, non soltanto dalle caratteristiche degli elementi in legno, ma anche dalle caratteristiche di rigidità dei collegamenti. In funzione del grado di precisione richiesto ai risultati, un'analisi di questo genere può essere indispensabile.

Il caso degli edifici realizzati con pannelli XLAM può essere rappresentato in modo simile. Anche in questo caso la struttura è composta da pannelli XLAM collegati fra loro tramite mezzi di collegamento meccanici. Anche i pannelli XLAM, spesso e a ragione definiti di grandi dimensioni, presentano dimensioni piuttosto ridotte se relate alla dimensione assoluta di un edificio multipiano. Il numero di collegamenti necessari alla realizzazione di una struttura di un edificio multipiano è comunque importante. L'importanza dei collegamenti può essere evidenziata in questo caso anche dalla considerazione che la struttura tridimensionale dell'edificio esiste fisicamente soltanto grazie alla presenza dei collegamenti, che in un certo senso permettono di trasformare degli elementi piani - cioè bidimensionali - in una struttura spaziale - cioè tridimensionale: le linee di collegamento - unidirezionali - agli spigoli comuni dei singoli pannelli XLAM permettono quindi di ottenere la struttura tridimensionale. Figura 32 mostra le linee di collegamento fra i pannelli XLAM, che possono essere in numero molto importante.

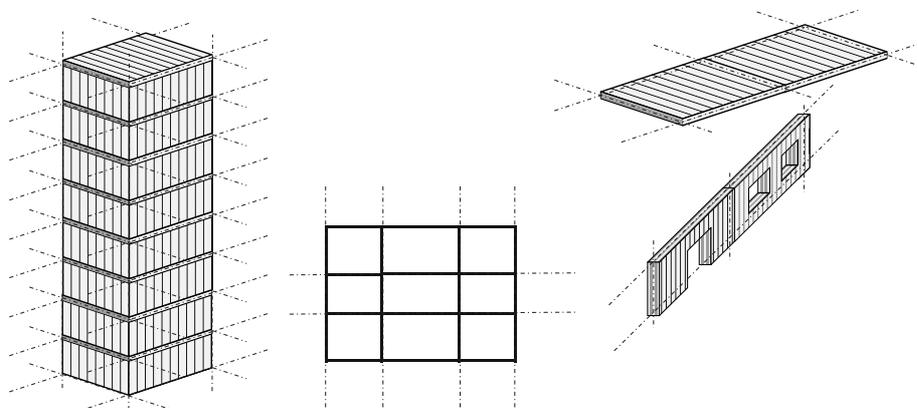


Figura 32: linee di collegamento di una struttura multipiano di pannelli XLAM

Indipendentemente dal tipo di collegamenti usato e dalla loro configurazione (si veda più sotto), il comportamento globale della struttura deve essere analizzato prendendo in considerazione anche le caratteristiche di rigidità dei collegamenti. Il collegamento parete-soletta-parete, quale esempio di una linea di collegamento fra i pannelli XLAM che compongono la struttura è rappresentato nella figura 33. Si può notare come la linea di collegamento sia ipotizzata come cerniera in libera rotazione lungo sull'asse dato dalla medesima linea, mentre il trasferimento di forze in tutte le rimanenti direzioni sia determinato da un comportamento elastico, da definire in funzione dei collegamenti scelti.

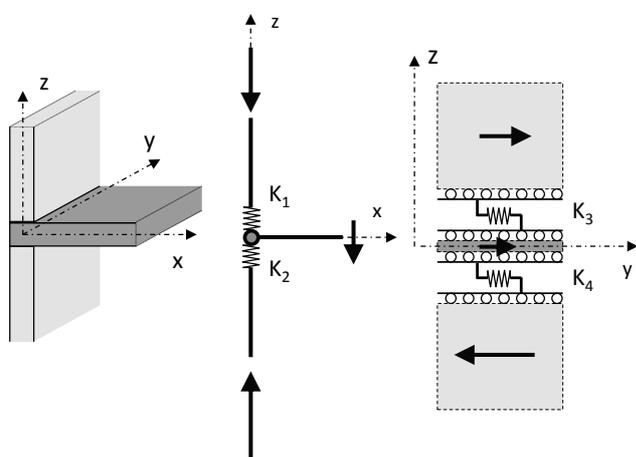


Figura 33: modello strutturale per l'analisi del comportamento di una linea di collegamento fra pannelli XLAM

Considerando che le singole pareti formanti la struttura tridimensionale di edifici di questo genere non sono prive di aperture, e che le aperture rappresentano un'interruzione della funzione strutturale della parete verso l'alto, anche in questo caso le pareti verticali della struttura non sono elementi monolitici, ma sono composte da più strisce, di lunghezza orizzontale diversa. Tale lunghezza orizzontale delle singole strisce può essere ridotta ai livelli superiori, in funzione delle aperture presenti i livelli superiori.

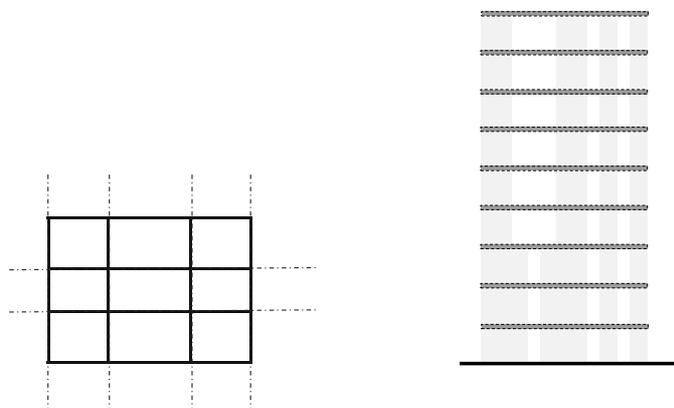


Figura 34: pianta della struttura e vista di una parete con gli elementi strutturali disponibili (strisce verticali di parete)

L'analisi della struttura con la considerazione degli effettivi rapporti di rigidezza dei pannelli XLAM e delle linee di collegamento permette di definire la distribuzione degli sforzi sui diversi elementi della struttura. È interessante e doveroso notare come proprio la presenza di collegamenti non rigidi determini le sollecitazioni all'interno della struttura e permetta di osservare come questo tipo di strutture presenti un comportamento profondamente diverso da altre costruzioni simili, ma realizzate con altri materiali. Una struttura di questo tipo realizzata in calcestruzzo armato, come usuale in diversi paesi d'Europa, può essere considerata come monolitica e analizzata prendendo in considerazione le caratteristiche meccaniche del materiale con cui è realizzata; i collegamenti fra le diverse superfici verticali e orizzontali che la compongono possono infatti essere ammessi come rigidi a tutti gli effetti. Nel caso della struttura realizzata con pannelli XLAM, la rigidezza dei collegamenti gioca un ruolo essenziale, come si può notare nella figura 35.

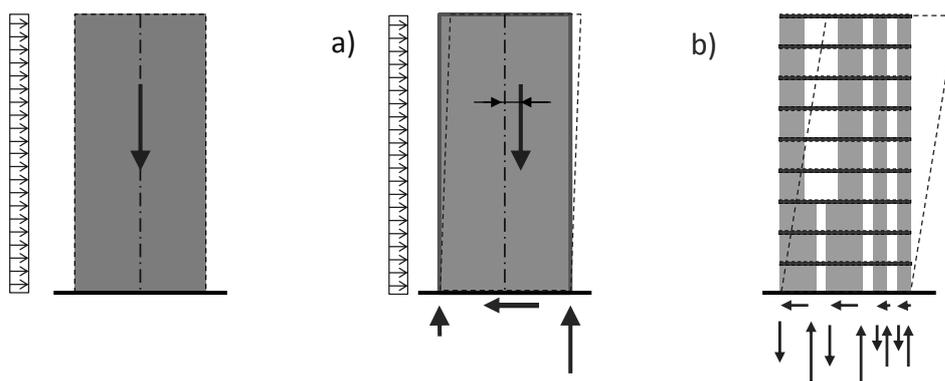


Figura 35: a) struttura monolitica con collegamenti rigidi b) struttura in XLAM con collegamenti non infinitamente rigidi

Si può osservare che le sollecitazioni risultanti nella struttura XLAM sono profondamente diverse da quanto non si ottenga con una struttura monolitica. In particolar modo si osserva come al piede delle singole strisce di parete si manifestino delle forze di trazione. Inoltre si ricorda che la rigidezza dei collegamenti è il parametro essenziale che determina questo aspetto: l'amento della rigidezza dei collegamenti permette di ridurre la grandezza assoluta delle forze al piede, mentre la riduzione della

rigidezza dei collegamenti all'interno della struttura provoca un aumento delle forze interne in tutti gli elementi.

A conclusione di queste considerazioni sul comportamento dei collegamenti e sull'importanza della rigidezza dei collegamenti in funzione della definizione delle forze e degli sforzi sui singoli elementi strutturali di costruzioni di grandi dimensioni, si può quindi sottolineare come la rigidezza dei collegamenti giochi un ruolo fondamentale. Ne consegue che la rigidezza dei collegamenti impiegati rappresenta un criterio di dimensionamento o di progetto per strutture di questo tipo. Si tratta di un aspetto solo apparentemente nuovo, poiché le strutture in legno di queste dimensioni rappresentano una novità a tutti gli effetti; si tratta però anche e semplicemente dell'applicazione della scienza delle costruzioni alle strutture di legno e specialmente in XLAM.

Anche in questo caso è doveroso osservare che considerazioni di questo genere non sono di importanza fondamentale per l'analisi di strutture semplici, relative ad edifici con un numero limitato di piani e da un numero limitato di pannelli. In caso di strutture in grande scala, questi aspetti diventano fondamentali e non possono essere trascurati.

4.4 La grandezza delle forze in gioco

L'effetto delle forze orizzontali comporta per tutte le strutture di edifici di legno la presenza di forze di trazione nei collegamenti con le fondamenta. È un dato di fatto con cui sono confrontati anche gli edifici più piccoli. Aumentando la taglia della struttura questo fenomeno si manifesta in modo proporzionale alla dimensione dell'edificio.

Passando alla grande scala delle dimensioni, queste forze possono assumere valori anche molto importanti. Forze di ancoraggio al suolo di 400 kN per ogni metro lineare di lunghezza di parete possono essere considerate come normali, mentre valori anche 3 o 4 volte più grandi possono manifestarsi qualora le regole di regolarità e semplicità della struttura non venissero rispettate.

4.5 La configurazione dei collegamenti

Partendo dal principio che per le tipologie di edifici basate sull'impiego di colonne e travi nell'ambito delle costruzioni in grande scala, questi elementi e i loro collegamenti sono disponibili e noti in quanto si applicano i principi, le tecnologie e le tecniche del legno lamellare incollato per le grandi strutture, ci si limita in questo capitolo ad alcune considerazioni in relazione agli edifici di grande dimensione con struttura in XLAM.

I collegamenti di pannelli XLAM utilizzati quotidianamente per le strutture degli edifici di dimensioni attualmente più comuni si basano sull'impiego di connettori della carpenteria in legno disponibili sul mercato e noti da tempo. Spesso sono impiegati collegamenti puntuali, dimensionandoli e verificandoli sulla base delle forze ottenute con modelli di calcolo semplificati. Questo modo di procedere permette di verificare la resistenza sufficiente del collegamento, ma non permette in alcun modo di sfruttare le prestazioni strutturali che il pannello XLAM offre. In altre parole, il collegamento puntuale permette di trasmettere le forze necessarie e risultanti dal calcolo della struttura, ma non permette di trasmettere al pannello forze di grandezza simile alla resistenza del pannello. In molti casi i mezzi di collegamento sono applicati su un solo lato del pannello, accettando talvolta in modo più o meno implicito le sollecitazioni parassite che ne risultano nei mezzi di collegamento stessi, negli elementi di legno e nell'insieme della struttura; spesso si usano per il collegamento di un medesimo elemento XLAM

collegamenti diversi e con caratteristiche di comportamento diverse. Questo modo di procedere, confortato dal successo delle soluzioni così sviluppate e applicate, e in parte contrario ai principi fondamentali della progettazione strutturale, può senz'altro essere accettato e fornire risultati soddisfacenti, fino a quando la prestazione meccanica e strutturale del pannello XLAM in questione è ben superiore della prestazione richiesta dal collegamento, o fino a quando la sola esigenza posta al collegamento è la trasmissione di una forza di entità ridotta ad un altro elemento della costruzione. Quando però le forze trasmesse dai mezzi di collegamento assumono grandezze simili alla resistenza dei pannelli XLAM collegati, o quando le esigenze poste ai collegamenti non si limitano alla sola resistenza minima, ma essi devono anche e soprattutto garantire una rigidità sufficiente del collegamento, diventando l'elemento basilare e indispensabile al corretto funzionamento strutturale dell'intera struttura portante, allora la progettazione e il dimensionamento dei collegamenti deve avvenire secondo altri criteri e con l'impiego di altre soluzioni costruttive.

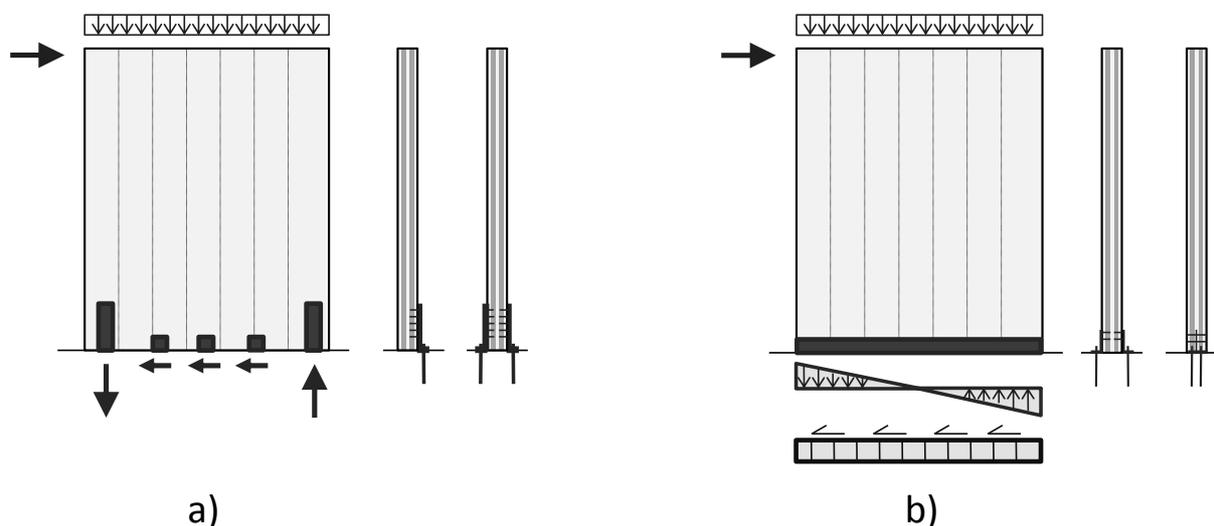


Figura 36: Collegamento all'estremità di un pannello XLAM:

- a) collegamento puntuale (ev. eccentrico) e con mezzi di collegamento con caratteristiche diverse fra loro: flusso di forze irregolare e discontinuo
- b) collegamento continuo, simmetrico e con caratteristiche omogenee e regolari su tutta la lunghezza: flusso di forze continuo, regolare e omogeneo

In caso di strutture di grandi dimensioni o con esigenze elevate, anche i collegamenti devono corrispondere alle esigenze generali seguenti e comuni a tutte le strutture cui sono richieste prestazioni elevate:

- permettere la trasmissione di forze che permetta al meglio lo sfruttamento strutturale dei pannelli collegati; ciò permette non soltanto di trasmettere forze più grandi, ma può essere di importanza essenziale in caso di sollecitazione eccezionali, o ancora permette di evitare punti deboli della struttura;
- avere una rigidità sufficiente ad assicurare il corretto funzionamento tridimensionale della struttura; in caso di edifici di grandi altezze ciò dovrebbe essere applicato quale criterio di dimensionamento

- permettere un flusso di forze regolare e continuo fra gli elementi XLAM collegati fra loro; in questo modo si evitano sollecitazioni puntuali elevate e rischiose, ma anche e in generale discontinuità nel flusso delle forze e punti deboli della struttura.

Il collegamento più frequente nella struttura di un edificio è rappresentato dal giunto parete-soletta-parete. La soluzione più semplice a tutti gli effetti, ma anche quella più interessante ai sensi di una struttura regolare e omogenea, è l'interruzione della parete e la posa della soletta XLAM fra le due pareti. La trasmissione delle forze di compressione può avvenire nella maggior parte dei casi per compressione trasversale dei pannelli XLAM delle solette. A questo proposito si ricorda che la resistenza allo schiacciamento, come pure la rigidità corrispondente, dell'XLAM nella direzione trasversale rispetto alla fibratura - cioè sullo spessore del pannello XLAM - è decisamente maggiore rispetto alla resistenza allo schiacciamento del lamellare incollato realizzato con il medesimo materiale. Ciò è dovuto principalmente all'effetto di sostegno degli strati incrociati. Grazie anche alla possibilità di usufruire di tutta la superficie di contatto disponibile lungo la parete, questi collegamenti non presentano di regola problemi. Inoltre questa soluzione permette di ottenere una regolarità ottimale della struttura e del flusso di forze.

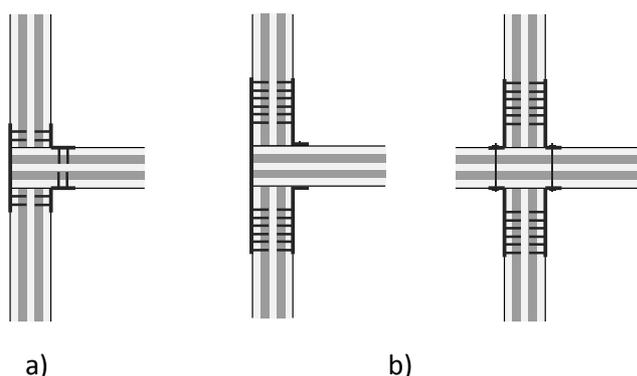


Figura 37: collegamento comune parete-soletta-parete XLAM:

- collegamento puntuale a taglio con angolari metallici
- collegamento puntuale a trazione con angolari metallici

Figura 37 mostra in modo schematico i collegamenti più comunemente usati per i pannelli XLAM. Ci si limita a notare che la soluzione a) con gli angolari metallici di lunghezza diversa ma molto ridotta, si ottiene una prestazione limitata alla sola trasmissione delle forze di taglio orizzontali con una rigidità pure molto ridotta a causa della trasmissione indiretta delle forze e della sollecitazione sfavorevole delle lamiere metalliche. La soluzione b) è realizzata con angolari puntuali e permette l'ancoraggio delle forze di trazione, ma di regola non la trasmissione di forze orizzontali. La combinazione dei due tipi di collegamento a) e b), frequentemente usata, non permette di definire in modo esatto la distribuzione delle forze fra i due tipi di collegamento, in quanto presentano caratteristiche di comportamento meccanico diverso fra loro. Come già indicato, si tratta di collegamenti adatti in caso di forze piccole rispetto alla resistenza dei pannelli XLAM collegati. A causa delle prestazioni comunque limitate dei mezzi di collegamento, questo tipo di connessioni non permette di sfruttare completamente il potenziale strutturale dei pannelli XLAM.

Nel caso di edifici di grandi dimensioni e di esigenze elevate in particolar modo in relazione alla rigidità delle connessioni e alla continuità del flusso di forze, si può ricorrere a collegamenti di altro

tipo e ben più efficaci sotto tutti i punti di vista. In particolar modo le tipologie di collegamento seguenti permettono di trasmettere forze di un ordine di grandezza simile a quello della resistenza dei pannelli XLAM collegati.

Il collegamento indicato in figura 38 è realizzato con staffe metalliche a T, perni di collegamento e spinotti di diametro ridotto. Si tratta di un collegamento estremamente performante in termini di resistenza e di rigidità, adatto ai collegamenti alla base delle strutture multipiano o agli ancoraggi al piede delle stesse.

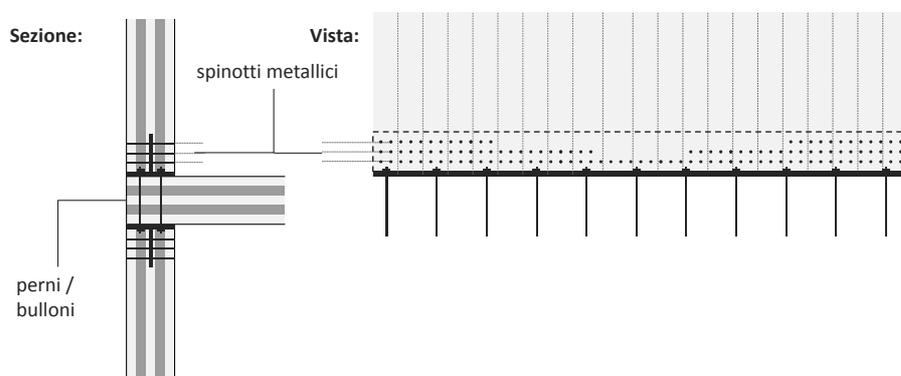


Figura 38: collegamento per prestazioni elevate parete-soletta-parete XLAM con staffe metalliche a T, perni e spinotti

In alternativa può essere interessante la soluzione indicata in figura 39, che offre caratteristiche di resistenza e rigidità in parte ancora migliori e non necessita di alcuna lavorazione degli elementi XLAM; in questo modo la sua realizzazione permette di compensare lievi imprecisioni o tolleranze di montaggio eventualmente presenti.

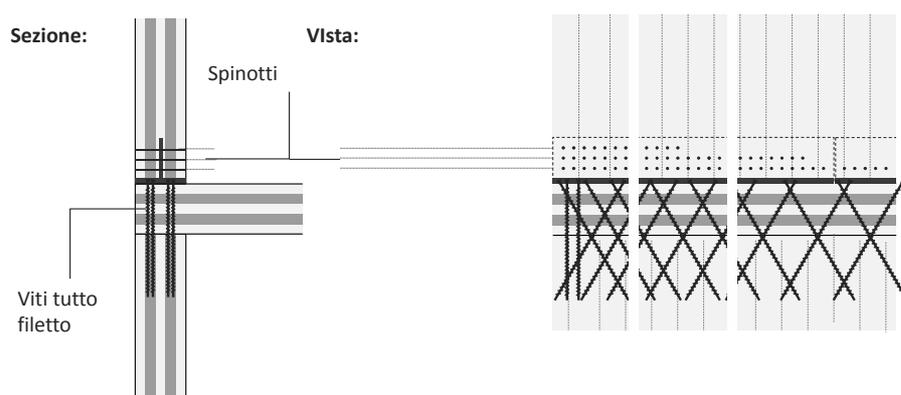


Figura 39: collegamento per prestazioni elevate parete-soletta-parete XLAM con staffe metalliche a T, viti a tutto filetto e spinotti

In caso di forze più ridotte, e nell'intento di garantire comunque al collegamento una rigidità sufficiente, è possibile rinunciare completamente all'inserimento di elementi metallici supplementare. In tal caso il collegamento può essere realizzato con l'ausilio di sole viti a tutto filetto, come indicato in figura 40. Pur se non di prestazioni tanto elevate come quelli appena illustrati, questo collegamento

permette un flusso di forze molto regolare e una rigidezza decisamente interessante. Da un punto di vista puramente geometrico, si tratta della soluzione più diretta e con il flusso di forze più regolare; anche se il termine è improprio se riferito ad una struttura portante, questo tipo di collegamento presenta una certa analogia con una cucitura, che ha il medesimo scopo di assicurare un flusso di forze omogeneo, sufficientemente rigido, resistente e regolare.

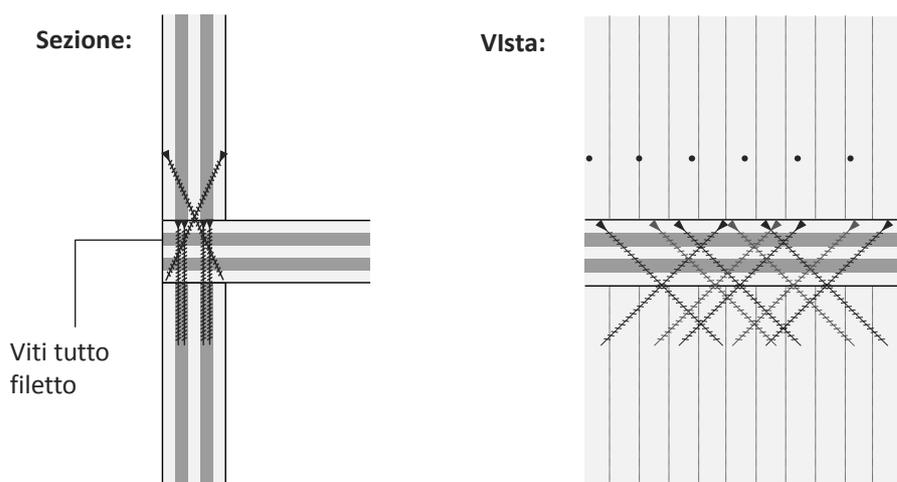


Figura 40: collegamento per prestazioni medio/alte parete-soletta-parete XLAM con sole viti a tutto filetto

Lo stesso principio può essere applicato ai collegamenti d'angolo ed ai collegamenti nel piano fra più elementi di pannelli XLAM. Anche in questo caso per edifici di grandi dimensioni occorre tener presente che il collegamento non rappresenta soltanto una misura costruttiva, ma la rigidezza di questi collegamenti è essenziale ai fini del corretto comportamento dell'intera struttura portante.



Figura 41: collegamento d'angolo e nel piano con viti a tutto filetto inclinate

4.6 Conclusione

I collegamenti sono un elemento essenziale e fondamentale di una struttura XLAM. Lo sfruttamento delle prestazioni meccaniche dei pannelli, elevate per loro natura e se confrontate con le prestazioni strutturali di elementi simili realizzate con altri materiali, permette di costruire strutture portanti per edifici di dimensioni notevoli, ma anche per edifici che presentano esigenze strutturali particolari e particolarmente elevate. Per sfruttare al meglio il materiale XLAM è necessario usare sistemi di collegamento che offrano prestazioni di resistenza e di rigidezza simili a quelle dei pannelli XLAM. Le soluzioni indicate nei capitoli precedenti permettono queste prestazioni.

5 L'effetto della sismica sulla grande dimensione

5.1 Aspetti generali

Gli aspetti legati alla sismica e alla necessità di poter offrire una sicurezza sufficiente anche in questo ambito sono spesso in prima linea nella discussione sulla scelta di realizzare in legno la struttura di un edificio di grande dimensione. Si è più volte già sottolineato come le strutture in legno, e in particolar modo quelle in XLAM, permettano di realizzare edifici anche di dimensioni notevoli e di poterne dimostrare senza troppe difficoltà e senza modifiche sostanziali anche la sicurezza sismica. Il presupposto per ottenere questi risultati è di rispettare i principi di base dell'ingegneria sismica fin dall'inizio della progettazione. Questi principi, che se considerati fin dall'inizio non sono di regola di intralcio alla progettazione architettonica, possono essere riassunti in modo molto semplice con le esigenze di semplicità, regolarità e ridondanza della struttura. Le indicazioni e le osservazioni fatte nei capitoli precedenti vanno tutte nella direzione di un rigoroso rispetto di questi principi. Lavorando con dimensioni importanti i principi non cambiano; dovrebbe essere cosa logica rispettarli in modo ancor più rigoroso.

Il rispetto delle regole di robustezza indicate sopra porta automaticamente ad una struttura ridondante, cioè con possibilità alternative di percorsi del flusso delle forze in caso di eventi accidentali. La regolarità della struttura è data, oltre che dalla scontata regolarità geometrica in pianta e in elevazione, dalla regolarità ottenuta con la suddivisione degli elementi da cui è composta la struttura e dalla regolarità del flusso di forze ottenuto con i collegamenti adeguati.

I collegamenti indicati nel capitolo precedente, distribuiti e disposti in modo continuo lungo tutte le linee di collegamento in modo da ottenere la continuità e la regolarità strutturale in relazione alla resistenza ed alla rigidità dell'intera struttura, sono una componente del rispetto di questi principi. La realizzazione di una struttura regolare e omogenea nel suo insieme impone per esempio di interrompere tutte le pareti ad ogni solaio e di variare gli spessori di pareti e solette in modo graduale e regolare, mantenendo spessori uguali o simili ad ogni piano e variandoli di piano in piano.

Rispettando questi principi la sicurezza sismica non dovrebbe creare sorprese in caso di edifici di grandi dimensioni. È infatti noto che l'aumento dell'altezza di costruzione comporta comunque un aumento delle forze orizzontali agenti su di essa, ma non necessariamente un aumento delle sollecitazioni in caso di azione sismica. Nel caso di strutture di legno, i primi studi al riguardo mostrano come al di sopra di un'altezza dell'edificio fra i 4 e i 6 piani, spesso sono le forze dovute al vento ad essere determinanti per il dimensionamento strutturale.

5.2 Il comportamento strutturale

Il comportamento strutturale in caso sismico delle strutture di legno è oggetto di continue discussioni. Sembra comunque assodato e dimostrato che anche le strutture in legno permettono di ottenere un comportamento almeno in parte duttile, e quindi dissipativo di energia in caso di azione sismica.

In questa sede ci si limita a ricordare che l'ammissione di un coefficiente di struttura più grande di 1,0 richiede una ammissione del comportamento meccanico della struttura anelastico e dissipativo di energia. I valori di grandezza di questo fattore di comportamento contenuti nella normativa attualmente in vigore in Italia permettono di lavorare con un coefficiente $q = 2,0$ per le strutture XLAM e con un

coefficiente $q=5,0$ per le strutture intelaiate classiche. In condizioni normali e usuali niente si oppone all'applicazione di questi valori

Nel caso di edifici in grande scala, dove cioè la definizione di opera di ingegneria strutturale di grandi dimensioni può essere applicata, occorre tenere ben presente che la possibilità di ricorrere alle riserve anelastiche della struttura in caso di evento sismico deve poter essere dimostrata in modo quantitativo. Occorre cioè poter dimostrare che la dissipazione di energia nei collegamenti si manifesta effettivamente e provoca una deformazione di carattere duttile, quantificabile e quantificata. Questa deformazione dei collegamenti deve inoltre essere compatibile con le deformazioni e le sollecitazioni degli elementi lignei da cui è composta la struttura nel suo insieme.

Che la dimostrazione di ciò non sia di immediata risoluzione appare piuttosto evidente, anche perché le regole e le procedure disponibili sono state sviluppate per altri materiali, dove le esigenze di duttilità sono spesso concentrate in zone ben delimitate e controllabili della struttura. E questo non significa che le strutture di grandi dimensioni in legno debbano rinunciare a queste caratteristiche o debbano essere dichiarate senza capacità dissipativa. E senza voler chiedere o imporre la rinuncia alle riserve anelastiche in modo generale, può essere interessante ricordare che, in caso di sismicità ridotta, la verifica della sicurezza sismica in ambito elastico può essere una soluzione molto semplice e molto efficace. Ne risulta una struttura verificata in modo semplice e chiaro, che però dispone comunque ancora di una riserva supplementare data dalle riserve anelastiche.

In caso di sismicità elevata, ambito nel quale non si dispone ancora di esperienze pratiche concrete, la strada da seguire potrebbe essere simile, ammettendo un certo tipo di dissipazione energetica in caso di eventi sismici di elevata intensità.

Queste considerazioni assumono un'importanza elevata non soltanto in relazione alla verifica dello stato limite in caso di evento sismico, ma anche in relazione al comportamento a servizio dell'edificio. In caso di edifici di grandi dimensioni, la committenza o la gestione dello stabile può essere particolarmente sensibile alla manutenzione o alle migliorie necessarie dopo un evento sismico di progetto.

L'ammissione di un ricorso alle riserve anelastiche della struttura anche in caso di eventi sismici di progetto o anche in caso di eventi sismici di portata ridotta comporta la necessità di ammettere una serie di possibili danni, quanto meno alle parti non strutturali della costruzione (cartongessi, finiture, finestre, ecc.). Questi fenomeni, difficilmente quantificabili, definiscono le misure di manutenzione ordinaria a seguito di un evento sismico, e i relativi costi di esercizio. Qualora si dovesse ammettere anche la possibilità di intervenire sulla struttura con delle riparazioni o con la sostituzione di alcuni elementi strutturali, allora si dovrebbe indicare nel corrispondente piano di manutenzione quali elementi, quali collegamenti e quali componenti devono essere controllati e sostituiti. La scelta di definire un evento sismico di progetto entro il quale la struttura non deve ricorrere alle riserve anelastiche, e quindi anche in presenza effettiva di quell'evento nessun intervento di miglioria o di manutenzione è necessario, può essere una soluzione nell'interesse della committenza e della gestione dello stabile. Dove questa scelta non comportasse interventi o modifiche o rinforzi della struttura, sarebbe nell'interesse di tutti. Nel caso in cui una scelta di questo tipo comportasse un investimento maggiore, questo potrebbe ancora essere messo a confronto con gli eventuali interventi necessari in caso di evento sismico, e portare comunque ad conseguenze e decisioni di rilievo già in fase di progettazione.

6 Il calcolo

Il calcolo di una struttura in grande scala deve essere commisurato all'importanza della struttura in questione e prendere in considerazione tutti gli aspetti citati fin qui. Di particolare interesse la modellazione numerica della struttura, che deve tener conto non soltanto delle caratteristiche particolari degli elementi di legno, ma che deve permettere di valutare in modo corretto anche l'effetto dei collegamenti sul comportamento strutturale. È inutile ricordare che una modellazione corretta richiede gli strumenti adatti e che per modellare una struttura composta da pannelli XLAM, notoriamente dalle caratteristiche meccaniche ortotrope e non corrispondenti a quelle degli altri materiali comunemente usati, occorre disporre di pacchetti software piuttosto performanti. Una buona parte dei programmi di calcolo per le strutture in legno sono calibrati e definiti per l'applicazione ai casi di uso comune. Ad esempio in alcuni casi le pareti XLAM vengono considerate come tali nella definizione del sistema, ma sono poi modellate internamente come aste con caratteristiche particolari al momento di procedere al calcolo. Oppure l'introduzione dei collegamenti delle loro caratteristiche elastiche è possibile solo in alcuni casi ben definiti, ma non in modo generalizzato.

Il calcolo di una struttura tridimensionale di un edificio di legno richiede quindi la disponibilità di un pacchetto software di calcolo generico e molto potente, oltre evidentemente alla dimestichezza d'uso dello strumento.

Spetta poi al progettista strutturale valutare i dati disponibili e realizzare un modello di calcolo che permetta di ottenere risultati attendibili e coerenti. In particolar modo si ricorda che i valori della rigidità dei collegamenti disponibili al giorno d'oggi sono il risultato di valutazioni basate su prove sperimentali spesso eseguite su campioni di dimensioni ridotte e in condizioni di laboratorio, con lo scopo di poter disporre di indicazioni che permettessero di valutare le deformazioni delle strutture di legno. Dovendo applicare queste basi a modelli per la valutazione della sicurezza strutturale di edifici di grandi dimensioni, è quanto meno consigliabile - ma dovrebbe essere cosa scontata - valutare anche la sensibilità del modello di calcolo e della struttura nel suo insieme alla variazione di questi valori. Si tratta comunque del modo di procedere standard in caso di impiego di modelli di calcolo complessi, anche al di fuori delle strutture di legno.

Da ultimo, e accettando il rischio di ricordare cose scontate, è opportuno ricordare che la complessità e il carattere particolare di un modello di calcolo non ne aumentano l'affidabilità, anzi spesso la mettono seriamente in discussione. La necessità di definire le caratteristiche meccaniche dei collegamenti impone la definizione dei collegamenti prima di poter descrivere tutta la struttura. Questa esigenza si presta molto bene a giustificare - qualora fosse necessario - un'analisi preliminare e semplice della struttura e delle forze in gioco negli elementi principali della struttura; i risultati di questa valutazione permettono di definire i collegamenti necessari e le loro caratteristiche, e soprattutto forniscono una base di confronto e verifica per la valutazione più approfondita che ne seguirà.

7 La complessità della struttura e il numero di piani

Dal punto di vista strutturale, la complessità dell'edificio o della struttura non deve necessariamente essere collegata al numero di piani dell'edificio stesso. Esempi di ville monofamiliari, cioè di edifici di dimensioni modeste, che si rivelano delle vere e proprie sfide dal punto di vista dell'ingegneria

strutturale, non ne mancano. La non disponibilità di materiali e collegamenti sufficientemente performanti ha fino a poco tempo fa precluso alla costruzione in legno la realizzazione di questo tipo di edifici. La disponibilità dei materiali e delle tecnologie disponibili al giorno d'oggi, li rendono possibili.

In questi casi, nonostante le dimensioni modeste, o la scala ridotta, valgono comunque tutte le considerazioni fatte nei capitoli precedenti.

8 Lo stato dell'arte

Con la definizione dello stato dell'arte si cerca spesso di definire i limiti nel periodo attuale raggiunti o raggiungibili. Parlando di edifici a grande scala è giocoforza valutare questi limiti con il numero di piani o l'altezza dell'edificio.

Alcuni esempi un po' ovunque in Europa e in parte anche al di fuori d'Europa, mostrano come al giorno d'oggi siano stati realizzati alcuni edifici con struttura di legno, in parte con struttura mista, di altezza di 8, 9 o 10 piani. Un cantiere al momento aperto in Italia indica che anche in zona sismica si può arrivare a questo livello, confermando le affermazioni fatte sopra.

In ambito tecnico e scientifico c'è un certo accordo di fondo nell'affermare che lo stato dell'arte attuale, cioè l'applicazione delle tecniche e delle tecnologie ammesse oggi come note e conosciute, permette di realizzare edifici con struttura di legno fino a circa 10 piani di altezza. Andare oltre è senz'altro possibile e i materiali disponibili permettono di essere positivi in questo senso, ma implica di andare a affrontare questioni e problematiche probabilmente nuove, per le quali le soluzioni devono ancora essere analizzate, valutate e concretizzate.

Diversi studi di fattibilità e diversi progetti sulla realizzazione di edifici di 15, 20 o in un caso anche di 30 piani, descrivono la possibilità teorica di realizzare con le conoscenze e le tecnologie attuali questi progetti. In un certo senso ciò conferma l'affermazione immediatamente precedente.